



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO**

**TESIS DOCTORAL
DISEÑO DE UN MODELO GENERAL PARA LA CUANTIFICACIÓN
DE LAS CONSECUENCIAS OCASIONADAS POR LA
INTERRUPCIÓN PARCIAL DE UNA RED CARRETERA EN EL
ESTADO DE MÉXICO**

**PRESENTA
ING. JOSÉ LUIS MENDOZA PLATA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
DOCTOR EN DISEÑO**

**TUTOR ACADÉMICO
DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ**

**TUTORES ADJUNTOS
DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS
DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO
DR. RENÉ LAURO SÁNCHEZ VÉRTIZ RUIZ
DR. SILVERIO HERNÁNDEZ MORENO**

**TUTORES SUPLENTE
DR. JESÚS AGUILUZ LEÓN
DR. IGNACIO MENDIOLA GERMÁN**

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MARZO 2021.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN.....	2
Antecedentes del trabajo de investigación	3
Objetivos del trabajo.....	5
Hipótesis	6
Estado del arte	6
Alcances y limitaciones	9
Descripción general de los capítulos	10
CAPÍTULO 1	12
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 La importancia de las carreteras	13
1.2.1 Ventajas de una Red Carretera	15
1.3 Clasificación de las carreteras	17
1.3.1 Clasificación de las carreteras por su funcionalidad	17
1.3.2 Clasificación de las carreteras por su importancia.	19
1.3.3 Clasificación administrativa de las carreteras	20
1.3.4 Clasificación de las carreteras por su Tránsito Diario Promedio Anual.....	20
1.3.5 Clasificación de las carreteras por su transitabilidad.....	22
1.4 Principales carreteras del país.....	23
1.4.1 Corredor Carretero de México.....	25
1.5 Principales carreteras del Estado de México	28
1.5.1 Principales ejes carreteros del Estado de México.....	29
1.6 Definición de red carretera	33
1.7 Resumen	34
CAPÍTULO 2	35
2.1 Antecedentes.....	36
2.2 Causas de la interrupción del servicio de una red carretera	39
2.2.1 Agentes perturbadores	39
2.2.1.1 Fenómenos naturales	40
A) Inundaciones y lluvias.....	41

B) Deslizamientos	42
C) Ondas frías.....	44
D) Ondas de calor.....	45
2.2.1.2 Fenómenos organizativos y/o sociales	46
A) Errores humanos y accidentes	47
B) Demostraciones de inconformidad social y concentraciones masivas de población	49
C) Vandalismo.....	51
2.3 Consecuencias de la interrupción del servicio.....	51
2.3.1 Factor humano	51
2.3.2 Factor medio ambiente	53
2.4 Clasificación de las consecuencias	54
2.4.1 Movilidad de la población	55
2.4.2 Congestionamientos	55
2.4.3 Seguridad.....	56
2.5 Cuantificación de las consecuencias.....	57
2.6 Resumen	58
CAPÍTULO 3.....	60
3.1 Resumen de la propuesta metodológica	61
3.2 Consecuencias socioeconómicas	61
3.2.1 Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento de tiempo de traslado.....	62
3.2.2 Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados	64
3.3 Consecuencias operacionales	66
3.3.1 Modelo numérico para el cálculo del incremento en los costos operacionales generados	67
3.4 Consecuencias al medio ambiente.....	68
3.4.1 Modelo numérico para el cálculo de las emisiones de CO ₂ generadas	69
3.5 Consecuencias de posibles accidentes con victimas	70
3.5.1 Modelo numérico para el cálculo de los costos materiales en accidentes	71
3.5.2 Modelo numérico para el cálculo de los costos por decesos en accidentes.....	73
3.5.3 Modelo numérico para el cálculo de los costos por heridos en accidentes	75
3.6 Consecuencias de posibles rutas con peaje	76
3.6.1 Modelo numérico para el cálculo de tarifas de peaje	76

3.7 Modelo General de Consecuencias (MGC).....	78
CAPÍTULO 4	78
4.1 Caso de estudio propuesto	80
4.1.1 Justificación del caso de estudio propuesto.	81
4.2 Configuración de la red carretera	82
4.2.1 Identificación de la ruta principal.....	82
4.2.2 Identificación de escenarios de interrupción del servicio.....	83
4.2.3 Identificación de rutas alternas	86
4.2.4 Datos generales de la red carretera propuesta	90
4.3 Consecuencias esperadas para el caso de estudio propuesto.....	94
4.3.1 Consecuencias socioeconómicas	95
4.3.1.1 Pérdidas ocasionas por el aumento de tiempo de traslado.....	96
4.3.1.2 Pérdidas ocasionas por la baja productividad de los afectados	101
4.3.2 Consecuencias operacionales	103
4.3.2.1 Incremento en los costos operacionales generados	103
4.3.3 Consecuencias al medio ambiente.....	105
4.3.3.1 Aumento de emisiones de CO2 generadas	106
4.3.4 Consecuencias de posibles accidentes con victimas.....	108
4.3.4.1 Costos materiales esperados en accidentes.....	109
4.3.4.2 Costos esperados por decesos en accidentes	111
4.3.4.3 Costos esperados por heridos en accidentes	113
4.3.5 Consecuencias de posibles rutas con peaje	115
4.3.5.1 Costos esperados por peaje en rutas alternas.....	116
4.4 Escenarios de falla.....	117
CAPÍTULO 5	121
5.1 Resultados.....	122
5.1.1 Resultados para el escenario de falla I.....	124
5.1.2 Resultados para el escenario de falla II	128
5.1.3 Resultados para el escenario de falla III.....	132
5.2 Análisis de los resultados	136
5.2.1 Análisis probabilístico	139
5.2.1.1 Implementación de una red bayesiana.....	140
5.3 Conclusiones.....	147
5.4 Comentarios finales y sugerencias para trabajos futuros.....	151

Referencias	153
Apéndice A Análisis del TDPA en estaciones de aforo SCT.....	159
Apéndice B Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento de tiempo de traslado	162
Apéndice C Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados	167
Apéndice D Modelo numérico para el cálculo del incremento en los costos operacionales generados	173
Apéndice E Modelo numérico para el cálculo de las emisiones de CO2 generadas	177
Apéndice F Estimación del costo promedio por accidente en el Estado de México	180
Apéndice G Modelo numérico para el cálculo de los costos materiales en accidentes.....	181
Apéndice H Modelo numérico para el cálculo de los costos por decesos en accidentes.....	183
Apéndice I Modelo numérico para el cálculo de los costos por heridos en accidentes.....	185
Apéndice J Modelo numérico para el cálculo de tarifas de peaje	187
Apéndice K Modelo General de Consecuencias	192
Apéndice L Distribuciones probabilísticas propuestas para SHP, SM y TC..	201
Apéndice M Rutina (macro) para exportación de datos de Excel	204
Apéndice N Matrices de coeficientes de correlación del MGC obtenidas en Uninet	205
ÍNDICE DE FIGURAS	208
ÍNDICE DE TABLAS.....	210
LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	211

RESUMEN

En el presente trabajo se propone el diseño de un modelo numérico para la cuantificación de las consecuencias derivadas de la utilización de diferentes trayectos carreteros alternos debido a la interrupción de una ruta o carretera principal, aplicando esta metodología al Estado de México y, de manera particular, al tramo Toluca-Palmillas dada la importancia de este trayecto a nivel estatal y nacional. Como es de esperarse, la interrupción del servicio de esta infraestructura ocasiona diversas consecuencias socioeconómicas, operacionales y ambientales además de aquellas originadas por accidentes con víctimas y de la utilización de trayectos complementarios con peaje. La implementación y uso del Modelo General de Consecuencias (MGC) propuesto, permite estimar una cuantificación certera de las consecuencias antes citadas, para generar una recomendación sobre la mejor ruta alterna disponible en función de las prioridades del tomador de decisiones, tanto desde la perspectiva del usuario como del administrador de la infraestructura.

ABSTRACT

A numerical model for the consequence's quantification derived from the use of different alternative road routes given the interruption of a main motorway has been designed. It is applied to one case study in the State of Mexico, the Toluca-Palmillas road, one of the most important highways in Mexico. As expected, the interruption of its service causes various socio-economic, operational and environmental consequences. These are in addition to those caused by accidents with victims and the use of complementary toll roads. The implementation and utilization of the proposed General Consequence Model (GCM) allows estimating an accurate quantification of the associated consequences. This leads to the generation of different recommendations related to the best alternative route available. They are based on the decision-maker's priorities from both the perspective of the user and that of the infrastructure administrator.

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En cualquier obra civil existen incertidumbres durante la etapa de operación, en el caso particular de las carreteras se tienen diversos factores que pueden afectar su correcto funcionamiento y generar a su vez una interrupción total o parcial de las mismas. Estos factores pueden ir desde deficiencias del estado físico en el que se encuentra la infraestructura hasta limitaciones geométricas, o bien, el hecho de contar con una capacidad de captación insuficiente comparada con el aforo vehicular que la utiliza.

Una vez ocurrida la interrupción de la infraestructura, los usuarios afectados deberán encontrar una alternativa para poder realizar su recorrido planeado, sin embargo, este cambio de ruta generará diferencias en los tiempos de recorrido, causará efectos en vehículos y usuarios además de dar lugar a posibles accidentes ocasionados por las diferencias respecto a las especificaciones técnicas y el estado físico de la ruta alterna elegida. Estos efectos se pueden traducir en consecuencias adversas las cuales servirán para elegir la mejor alternativa disponible y cuya cuantificación es objeto de la presente investigación.

Ahora bien, conocer las consecuencias de la utilización de una ruta alterna, al quedar interrumpida la ruta principal, es de vital importancia para contar con el contexto preciso de la interrupción del servicio así como de las implicaciones de su utilización. Esto derivado en que en la mayoría, al momento de elegir una ruta alterna, no se consideran factores que pueden ser desde el desgaste en los vehículos y por ende un aumento en el consumo de sus insumos, así como en el costo derivado de posibles tramos con peaje hasta factores relativos a los usuarios afectados así como el valor de su tiempo o la disminución del rendimiento durante su jornada laboral al haber sido expuestos a tiempos de recorrido mayores a los habituales al dirigirse a su trabajo.

Asimismo, conocer la mejor alternativa de recorrido no sólo representa ahorros significativos para los usuarios, quienes son directamente perjudicados, sino que permite prever cuáles serán las rutas mayormente utilizadas al quedar interrumpido un trayecto principal. Desde esta perspectiva, una vez ocurrido lo antes descrito, se podrán realizar algunas acciones para permitir el tránsito eficiente de los vehículos bajo medidas preventivas, las cuales podrán ir desde la priorización del mantenimiento en algunos de los tramos involucrados, hasta el mejoramiento de su geometría o incluso su reconstrucción ya que,

generalmente, las alternativas disponibles no cuentan con las mismas especificaciones técnicas en comparación con aquellas que conforman a la ruta principal.

Actualmente, existen diferentes estudios donde se estiman las pérdidas ocasionadas por la interrupción de una red carretera, sin embargo, en su mayoría estos únicamente reportan dichas consecuencias en términos de las horas que dura la interrupción del servicio, o bien, de los vehículos afectados y accidentes derivados. Por este motivo, resulta evidente la necesidad de contar con una metodología sencilla y replicable que pueda ayudar al tomador de decisiones a elegir la mejor ruta disponible mientras que al usuario le interesará llegar a su destino en el menor tiempo posible, desembolsando la menor cantidad de dinero, así como también para el administrador de la red carretera. Por otra parte, la prioridad será brindar las mejores condiciones al usuario por lo que deberá procurar no solamente que la ruta principal se encuentre en buen estado sino además quedará a su consideración el mantenimiento y/o mejoramiento de la mejor ruta alterna disponible. De esta manera si la ruta principal se interrumpe, los usuarios contarán por lo menos con una alternativa viable y en buenas condiciones para lograr su recorrido.

En la presente investigación se realiza una recopilación de las principales consecuencias originadas por la interrupción del servicio de una red carretera, asimismo se logra una cuantificación de estas a partir de un **Modelo General de Consecuencias (MGC)** que engloba algunos modelos existentes y otros desarrollados por el autor, bajo el planteamiento de una ruta principal y las diferentes rutas alternas disponibles. De esta manera, el modelo propuesto no solamente permite cuantificar las consecuencias esperadas en la utilización de una ruta alterna, sino que permite generar una recomendación sobre la mejor ruta elegir a partir del efecto de una o más variables que intervienen en el cálculo de las consecuencias en función de las prioridades del tomador de decisiones. A grandes rasgos y bajo los supuestos anteriores, es posible cuantificar las consecuencias de la interrupción parcial o total de una red carretera a partir del establecimiento de una ruta principal al quedar interrumpido uno o varios de los subtramos que la integran así como de las alternativas disponibles de recorrido para los usuarios afectados. Finalmente, la metodología propuesta se aplica a un caso particular: la Carretera Federal 57 en el tramo Toluca-Palmillas, dada la importancia de dicha infraestructura a nivel estatal y nacional.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo general es diseñar un modelo que permita cuantificar de una manera efectiva las consecuencias derivadas de la utilización de diferentes rutas alternas al quedar interrumpida la ruta principal, donde esta última representa el recorrido cotidiano de los usuarios hasta su lugar de destino. Para la cuantificación de las diferentes consecuencias de dicha interrupción se propone en primera instancia la identificación de cada una de estas a partir de una revisión ardua de la bibliografía existente. Posteriormente, en una segunda instancia, se busca lograr su cuantificación a partir de la comparación entre los costos esperados en la ruta principal y aquellos generados en cada una de las rutas alternas disponibles, obtenidos a su vez de modelos ya existentes, o bien, desarrollados por el autor para los fines antes expuestos.

Asimismo, los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

- a) Determinar las consecuencias derivadas de la interrupción del servicio de una red carretera a partir del establecimiento de una ruta principal y una o varias rutas alternas.
- b) Identificar los factores que generan consecuencias adversas posteriores a la interrupción del servicio del tramo carretero.
- c) Determinar cuáles son los costos que generan mayor impacto en las consecuencias y enfocar la investigación en su cuantificación.
- d) Proponer una metodología cuantitativa para lograr la estimación de cada uno de los costos seleccionados, o bien, si ya existe una específica para su cuantificación, ajustarla para el escenario propuesto.
- e) Utilizar la metodología propuesta para cuantificar las consecuencias esperadas dada la interrupción de los principales tramos carreteros en el Estado de México, abordando el concepto de consecuencias, como la diferencia entre los costos esperados al utilizar la ruta principal y aquellos generados por las rutas alternas disponibles.
- f) Realizar un análisis probabilístico para lograr una mejor interpretación de los costos esperados y así poder determinar cuáles de estos tienen un mayor peso en la cuantificación de las consecuencias para el caso de estudio propuesto.
- g) Generar un conjunto de recomendaciones respecto a la mejor ruta alterna disponible para el caso de estudio propuesto.

HIPÓTESIS

H0: Dada la interrupción parcial de un tramo carretero y bajo el supuesto de la existencia de varias rutas alternas para cumplir con un recorrido programado, la utilización de un modelo para la cuantificación de las consecuencias esperadas es una herramienta eficaz para conocer la mejor alternativa disponible.

H1: Dada la interrupción parcial de un tramo carretero y bajo el supuesto de la existencia de varias rutas alternas para cumplir con un recorrido programado, la utilización de un modelo para la cuantificación de las consecuencias esperadas no es una herramienta eficaz para conocer la mejor alternativa disponible.

ESTADO DEL ARTE

En la actualidad se cuenta con avances importantes respecto a la evaluación de los costos ligados a las carreteras, mientras algunos abarcan la parte operacional de los vehículos, otros se centran en la cuantificación de los costos ocasionados por accidentes o de las emisiones de contaminantes al medio ambiente. Dentro de los trabajos más destacados se tienen:

- Miller, *et al.* (1991): Proponen una metodología para estimar los costos derivados de accidentes en carreteras, a partir de los índices reportados referentes a accidentes con víctimas, heridos, pérdidas materiales. De esta manera se determinan los costos esperados para los usuarios, los cuales contemplan gastos directos a sus bolsillos derivados de seguros médicos y servicios de aseguradoras de vehículos. Asimismo, se realiza una cuantificación aproximada de los costos legales derivados de los accidentes, aquellos derivados de retrasos en los tiempos de traslado y otros más implícitos como el dolor o sufrimiento causado a los afectados y la pérdida de calidad de vida.

- Levinson, Gillen, & Kanafani (1996): Realizan un estudio para cuantificar los costos sociales en los sistemas de transporte donde las mediciones realizadas principalmente estiman los efectos del ruido, contaminación al medio ambiente, accidentes y congestionamientos. Como parte de los resultados respecto a la aplicación de la metodología a las vías terrestres se obtiene que los costos sociales representan un 15% del costo total de viaje por carretera, asimismo, los costos más representativos son los correspondientes a los accidentes derivados del viaje, seguidos por los costos derivados por congestiones y finalmente aquellos ocasionados por ruido y contaminación en una menor medida.

- Miller, Lestina, & Spicer (1998): Presentan una metodología para la cuantificación de los costos de accidentes en carreteras en función de la edad y estatus del conductor, así como si este se encuentra bajo el influjo de alguna sustancia nociva para la salud como es el caso del alcohol. De la investigación se desprende la información necesaria para realizar estudios de costo beneficio que derivó en la implementación de medidas de restricción para expedición de licencias de conducir ya que los accidentes en su mayoría se presentaban en conductores menores de edad.

- Daniels, Stockton, & Hundley (2000): Desarrollan un modelo simplificado de costos de usuarios en carreteras *Road User Costs* (RUC por sus siglas en inglés). En este modelo de simulación las consecuencias se entienden como el incremento en los costos diarios de los usuarios al estar interrumpido un tramo carretero, en este caso por motivos de mantenimiento o labores de mejora. Como resultado del trabajo se tiene que principalmente estos costos se deben al tiempo perdido de los usuarios ocasionados por congestión o un redireccionamiento por una ruta complementaria lo que genera tiempos de recorrido mayores.

- Bayraktar & Hastak (2009): Implementan una red bayesiana para la toma de decisiones relativa a la priorización del mantenimiento brindado a carreteras en función de la distancia cubierta por el mantenimiento, carriles disponibles y estrategias para su cierre, así como la duración, calidad y aspectos de seguridad mostrados en la etapa de mantenimiento. De esta manera, la metodología se aplica a dos casos de estudio y donde se muestra al lector que puede ser utilizada tanto para redes carreteras ya conformadas como para redes en vías de desarrollo.

- Márquez Díaz & Cantillo Maza (2011): Presentan una metodología para modelar estratégicamente el transporte de carga aplicada a la evaluación de proyectos. En dicha investigación se consideran los costos originados por factores tanto externos como internos para la conformación de funciones de costo aplicadas a una red modal de carreteras. Aunque la metodología a base de arcos es aplicada a una red carretera en Colombia, esta podría aplicarse a otros sistemas de transporte. En ella se describen algunos parámetros de interés como el valor del tiempo y los costos de operación además de costos externos como la congestión, los accidentes, la contaminación, el cambio climático y los daños a infraestructura carretera.

- Posada Henao & González Calderón (2013): Desarrollan un modelo para la estimación cuantitativa para el cálculo de consumo de combustible en vehículos automotores tomando como parámetro el costo de operación vehicular. El modelo muestra que el consumo del combustible está ligado a diversas variables donde se incluyen las características de la carga y los vehículos así como la carretera en estudio. Asimismo, la metodología propuesta permite predecir con cierto grado de exactitud el consumo de combustible generado por los vehículos de la muestra en condiciones particulares de operación, sin embargo, esta debe ajustarse a las condiciones particulares del lugar de interés.

- Ríos, *et al.* (2016): Implementan una serie de modelos para la cuantificación de CO₂ (Dióxido de Carbono) desde el punto de la demanda de transporte y para ello se emplean diversos datos obtenidos de una encuesta de movilidad. Aunque la metodología es aplicable solamente para una región de España, los resultados permiten conocer la relación que existe entre las emisiones esperadas de CO₂ y algunas de las variables socioeconómicas y territoriales que contribuyen a la emisión de este contaminante.

- Arroyo, *et al.* (2016): Presentan una metodología sencilla para la estimación de los costos de operación vehicular aplicada al contexto de México en función de las características geométricas y el estado de las carreteras nacionales. En este caso, VOCMEX (*Vehicle Operating Cost México*) es una adaptación del Modelo *Vehicle Operating Costs* desarrollado por el Banco Mundial adaptado al contexto nacional y cuya finalidad es estimar los costos de operación vehicular bajo diferentes condiciones geométricas y físicas de las carreteras.

De esta manera, las diferentes investigaciones y trabajos descritos en este apartado se centran en la cuantificación de sólo uno o varios tipos de costos derivados de la utilización de una carretera, sin embargo, los modelos y metodologías antes descritas no engloban la totalidad de las consecuencias esperadas ya que estas pueden tener distintos orígenes lo cual resulta en la necesidad de contar con un modelo que las abarque en su totalidad. Ahora bien, el enfoque de la presente investigación no se basa exclusivamente en la cuantificación de las consecuencias esperadas al realizar un recorrido por carretera sino en su interpretación, siendo su principal aplicación la de recomendar la mejor ruta disponible, una vez ocurrida la interrupción del trayecto cotidiano de los usuarios, es decir, una vez interrumpida la ruta principal.

Por consiguiente, la falta de un método específico para la cuantificación de las consecuencias más relevantes de la interrupción de una carretera así como el hecho de que los modelos existentes abarquen parcialmente sus efectos ocasionan que su cuantificación sea subjetiva en la práctica, lo que puede llevar a tomar una mala decisión que se refleje en costos mayores tanto para los usuarios como para los administradores de la red carretera en función del periodo de tiempo que dure la interrupción de la infraestructura. Es por eso que surge la necesidad de contar con un método capaz de cuantificar los costos ocasionados por la interrupción de una red carretera aplicable al contexto de una región particular y que de manera sencilla y simplificada permita determinar cuál de las alternativas disponibles representa la mejor opción en función de las prioridades del tomador de decisiones.

ALCANCES Y LIMITACIONES

En la presente investigación se desarrolla un modelo numérico para la cuantificación de las consecuencias derivadas de la interrupción del servicio de una red carretera a partir del establecimiento de una red principal y las posibles rutas alternas, puesto que, este tipo de consecuencias muchas veces se desprecia o se determina cualitativamente. Una vez estimados los costos originados por la utilización de la ruta principal y las rutas alternas disponibles, se cuantificarán las consecuencias como la diferencia entre estos costos. Por lo anterior, se busca que los resultados del proyecto ayuden a realizar una recomendación sobre la mejor ruta disponible y de esta manera facilite la toma de decisiones dada la ocurrencia de la interrupción.

De este modo se intentarán cubrir la mayor cantidad de consecuencias, desde aquellas referentes a los costos de operación vehicular hasta aquellas relativas al incremento en el índice de accidentes, o bien, donde se tengan que recorrer tramos sujetos a peaje. De manera específica el MGC se basa en modelos existentes así como en aquellos desarrollados durante la misma investigación, con el fin de determinar cuantitativamente el efecto de cada uno de los factores que intervienen en la generación de consecuencias.

Finalmente, a partir de los ocho modelos que integran al MGC se realizará la cuantificación de las consecuencias esperadas dada la interrupción de un tramo carretero, ya que esta es uno de los principales objetivos de la investigación, por lo cual su interpretación y análisis se desarrollan en la etapa final de la misma con el propósito de establecer recomendaciones enfocadas a priorizar la utilización de las rutas alternas disponibles y, por

ende, sean de utilidad para el tomador de decisiones tanto desde el punto de vista del usuario como del administrador de la red carretera.

Para describir el contexto de la investigación y sus limitaciones es necesario mencionar que tiene validez únicamente para el caso de estudio propuesto, es decir, el tramo carretero Toluca-Palmillas que forma parte de la Carretera Federal 57. Sin embargo, se busca que el lector pueda reproducir esta metodología y ajustarla para redes carreteras de su interés, obteniendo de esta manera una cuantificación de las consecuencias derivadas de la interrupción del servicio más cercana a la realidad y sin ayuda de terceros.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS CAPÍTULOS

A continuación, se describe de manera detallada cada capítulo que conforma el documento:

Capítulo 1: Aquí se describe la relevancia de las carreteras así como los antecedentes de estas obras civiles que han sido indispensables para el desarrollo social y económico de la humanidad, permitiendo principalmente el transporte de bienes y servicios. Además, hace mención de su clasificación de acuerdo a su función, importancia y transitabilidad, entre otras. De igual manera se realiza un recuento sobre las principales carreteras a nivel nacional y estatal, donde destacan algunos corredores y ejes carreteros. Finalmente, se describe de manera breve el concepto de red carretera, es decir el conjunto de carreteras o tramos carreteros conectados entre sí.

Capítulo 2: En él se definen las principales causas de la interrupción del servicio de una red carretera así como los agentes perturbadores que inciden en dicha interrupción. Una vez conocidas las causas posteriormente se describen las consecuencias ocasionadas por la interrupción del servicio de la red así como la clasificación. Al final del capítulo se describen las metodologías y modelos existentes para su clasificación.

Capítulo 3: Aquí se describe la metodología propuesta para la cuantificación de las consecuencias ocasionadas por la interrupción del servicio de una red carretera. A partir de la clasificación obtenida en el capítulo anterior aquí se establecen los modelos utilizados y propuestos para el cálculo de las consecuencias ocasionadas, las cuales se agrupan en cinco grandes grupos conformados por las consecuencias socioeconómicas, operacionales, ambientales, materiales y humanas, además de aquellas generadas por las tarifas derivadas de la utilización de rutas alternas que involucran peaje.

Capítulo 4: Se describen los datos del caso de estudio propuesto, así como la relevancia y posible impacto que ocasionaría la interrupción de dicho tramo carretero. Así pues, se describe el procedimiento a seguir para obtener las consecuencias esperadas dado el establecimiento de tres escenarios de falla. Finalmente, se aplica la metodología propuesta por el autor al tramo Toluca-Palmillas, el cual forma parte de la Carretera Federal 57, una de las principales carreteras a nivel estatal y nacional. Además, se describe la configuración de la red carretera propuesta desde la identificación de la ruta principal hasta los escenarios de posible falla o interrupción, los cuales dan lugar a las rutas alternas disponibles.

Capítulo 5: En este apartado se analizan y discuten los datos obtenidos en el capítulo anterior, se realiza una interpretación de las consecuencias para cada escenario de interrupción del caso de estudio propuesto y se generan recomendaciones al lector sobre la mejor ruta alterna disponible. Después se realiza un análisis probabilístico para lograr una mejor comprensión sobre las variables consideradas en los modelos que conforman al MGC. Finalmente se muestran las conclusiones a las que se llegó con la investigación así como las sugerencias para trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

REDES CARRETERAS

1.1 ANTECEDENTES

En nuestro país las carreteras han tenido un papel fundamental para el desarrollo nacional pues han permitido el desplazamiento de bienes y servicios a lo largo de los años al conectar los distintos estados de la República y sus municipios, además de los asentamientos humanos más remotos, fortaleciendo de esta manera el desarrollo de México.

Este intercambio de bienes y servicios es una demanda permanente y forma parte de la dinámica económica nacional misma que hoy en día les ha otorgado un valor significativo a las carreteras obligando al Estado a incrementar los estándares y especificaciones de este tipo de infraestructura para generar una mayor competitividad a nivel local, regional o nacional.

La evolución que han sufrido las carreteras en nuestro país a través del tiempo ha dado como resultado el crecimiento de la sociedad a la que dan servicio además de la mejora en la calidad de vida de los usuarios; ya que con el paso de los años no sólo se ha permitido acortar distancias entre los destinos de sus habitantes sino que se ha logrado una disminución considerable en los costos de recorrido de los mismos.

Entre los años de 1995 y 2000, de acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en México se construyeron y modernizaron más de 10 mil kilómetros de vialidades (SCT, 2016). Sin embargo, con el paso del tiempo las tendencias demográficas así como el inminente crecimiento económico del país han generado la necesidad de implementar servicios de transporte con mayores especificaciones, logrando de esta manera que las vías terrestres sean cada vez más eficientes, seguras y confiables así como dar lugar al crecimiento del sector transporte a nivel nacional y estatal desde las llamadas supercarreteras hasta los caminos rurales de difícil acceso.

1.2 LA IMPORTANCIA DE LAS CARRETERAS

Uno de los principales referentes para el desarrollo económico de México y de cualquier otro país ha sido la creación de infraestructura y medios de transporte que permitan una buena comunicación y un traslado eficiente de un punto a otro en menor tiempo. De manera particular, México ha contado con diferentes Planes de Desarrollo a través de los años en los cuales se ha considerado la interacción entre los principales sectores que participan activamente en la dinámica de transformación económica y social del país. Cabe mencionar que una de las herramientas primordiales que ha permitido satisfacer las metas y objetivos

planteados en los Planes antes mencionados es la infraestructura carretera ya que promueve el desarrollo económico, industrial y logístico del país.

La infraestructura carretera se puede ver como la base para el funcionamiento no solamente de la economía nacional sino de las economías locales ya que genera un efecto directo en los beneficios económicos de sus usuarios, por lo tanto, la conservación de esta infraestructura vial es imprescindible para preservar y aumentar estos efectos positivos a la sociedad en general. Dentro del Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal y de manera específica en el Artículo 3 (SCT, 2012) se hace mención a las disposiciones viales donde se destaca que en cualquier vía federal será necesario garantizar una correcta fluidez vehicular así como la seguridad pública correspondiente. Es aquí donde la planeación y la presupuestación de las carreteras adquieren importancia, puesto que, estos procesos van de la mano con la toma de decisiones referentes a cuándo reparar, ampliar o dar mantenimiento este tipo de infraestructura.

Por otra parte, de acuerdo con el Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, la infraestructura carretera es la encargada de movilizar al 81% de las mercancías o cargas nacionales. De igual manera, el 98% de las personas que transitan por el territorio nacional utilizan las carreteras nacionales para llegar a su destino. Para poder cubrir esta demanda, la red carretera se ha fortalecido con más de 377,660 km de longitud, los cuales se dividen en redes federales así como carreteras alimentadoras, rurales y brechas mejoradas respectivamente (Ver Figura 1.1).

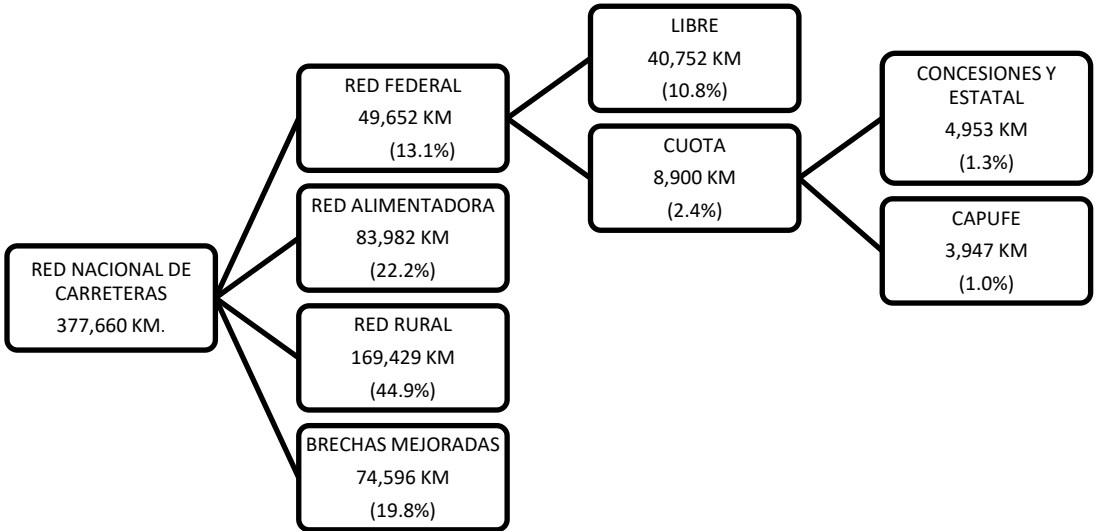


Figura 1.1 Composición de la red nacional de carreteras (Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, 2014)

De acuerdo a la Secretaría de Gobernación (SEGOB), en México existen 14 corredores carreteros en desarrollo donde actualmente se tiene una modernización del 68.6% en su conjunto, sin embargo, la mayor parte de las carreteras que los conforman cuentan con un nivel de servicio suficiente para la demanda actual. Sin embargo, estos niveles de servicio pueden disminuir al incrementar los flujos de carga que transitan por estas vías terrestres, o bien, por una mala o nula implementación de un programa de conservación y mantenimiento (SEGOB, 2018).

Para garantizar el correcto funcionamiento de una red carretera así como una fluidez vehicular adecuada para poder brindar la seguridad necesaria dentro de la misma, es indispensable cumplir con los siguientes principios (SCT, 1971):

1. Para poder ofertar un servicio eficiente en una red carretera es necesario implementar un mecanismo de conservación.
2. Para poder obtener los beneficios esperados de una infraestructura de este tipo es necesario cumplir con los periodos de ejecución, ya que los retrasos en las obras generan efectos negativos.
3. Los nuevos proyectos carreteros deben tener como prioridad los puntos de mayor crecimiento social y económico entre otros, garantizando de esta manera la comunicación entre estos.
4. Aun cuando ya existan carreteras que permitan la comunicación entre dos puntos de interés, será necesario mejorar este sistema de comunicación con nueva infraestructura cuando la demanda vehicular supere las especificaciones actuales.

1.2.1 Ventajas de una Red Carretera

La eficiencia de un proyecto carretero está dada en función de las mejoras y ventajas que brindará al usuario final. Estas ventajas pueden medirse en función de los tiempos de recorrido de los usuarios así como de los costos de operación vehicular, en comparación con la inversión requerida para la conformación de la infraestructura. Visto de esta manera, la factibilidad del proyecto carretero dependerá de la relación entre los beneficios que obtendrá la sociedad con implementación del proyecto y el costo de la inversión para proporcionar este servicio (SCT, 2011).

Para lograr un mejor entendimiento respecto a la conceptualización de una red carretera y de sus ventajas, se puede identificar una situación anterior al proyecto, es decir, un escenario sin la infraestructura construida y otro escenario o situación con proyecto, es decir, con la obra ya constituida.

El planteamiento antes descrito es muy común en los estudios de costo beneficio para determinar la factibilidad de proyectos nuevos y se basa principalmente en la relación que existe entre la oferta actual de la infraestructura vial en estudio y la demanda a la que esta se encuentra sujeta. De esta manera, la oferta se referirá a la infraestructura carretera con y sin proyecto, mientras que la demanda será aquella generada por la estimación del tránsito probable tanto para la situación con y sin proyecto así como de sus posibles particularidades.

Aunado a lo anterior y tomando en cuenta que la finalidad de la construcción o modernización de una Red Carretera es ofrecer una mejora para el usuario comparada con su situación actual, entonces los beneficios o ventajas más notables de esta serán los siguientes (Cummings, 2011):

- Reducir los costos de operación para el usuario.
- Ahorro en tiempo de viaje.
- Recorridos ligeros.
- Aumentar la seguridad.
- Minimizar los tiempos de espera.
- Mayor comunicación entre estados y municipios.
- Desarrollo económico y comercial.
- Mejora en el posicionamiento de cada ciudad o región.
- Elevar la calidad de vida de los usuarios.
- Comodidad en los tiempos de traslado.
- Mejor desplazamiento, flexibilidad y rapidez.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS

A nivel individual, todos los caminos se comunican entre sí de modo que cada uno puede formar parte de una red o sistema comunicando a su vez a ciudades, comunidades o regiones enteras. En cuanto a su utilidad, características y eficacia, los caminos o carreteras pueden adquirir diferentes posiciones jerárquicas además de un orden e importancia relativa dentro de una red. Para un mejor estudio las carreteras se pueden clasificar por:

1. Funcionalidad
2. Importancia
3. Fines administrativos
4. Tránsito Diario Promedio Anual
5. Transitabilidad

1.3.1 Clasificación de las carreteras por su funcionalidad

Dentro de los criterios de planeación, la red vial se clasifica de acuerdo a las funciones particulares de las carreteras, según este criterio el traslado de mercancía y el transporte de personas permiten que se pueda realizar una distinción entre estas, las cuales se dividen en tres grupos (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2007):

Principales (arterias): Son de acceso controlado y tienen como fin permitir una movilidad eficaz para altos volúmenes de tránsito, las cuales se distinguen por contar con una mínima de accesos laterales.

Secundarias (colectoras): Vialidades de fácil acceso a laterales, de volúmenes de tránsito menores a las arterias o principales.

Locales: Se trata de vialidades que dan acceso a una comunidad o localidad específica.

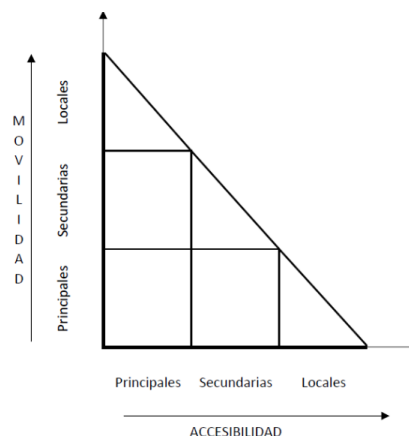


Figura 1.2 Clasificación funcional del sistema vial (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2007)

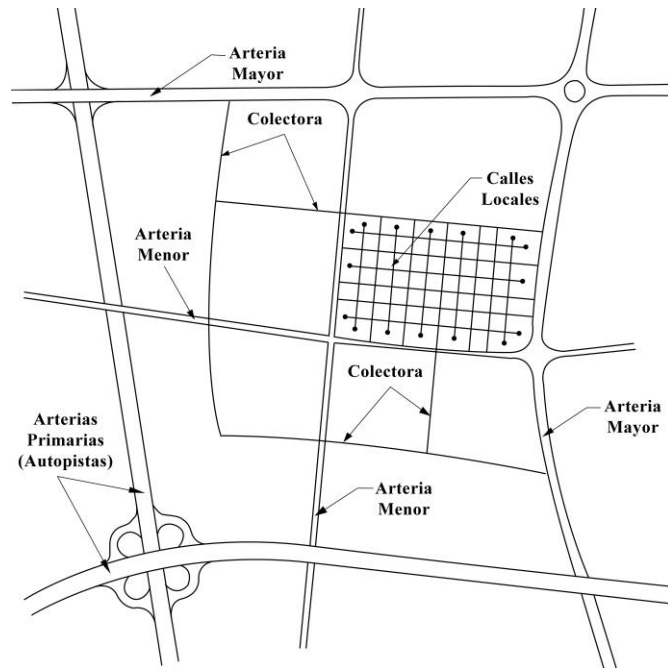


Figura 1.3 Jerarquía de un sistema vial urbano (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2007)

De manera gráfica, la clasificación de las carreteras por su función se puede observar en la figura 1.3, mientras que su funcionalidad, de acuerdo al tipo de accesibilidad y a la movilidad que surge entre ellas de acuerdo a la estructura y trazabilidad de las mismas, se representa en la figura 1.2.

Esta clasificación contribuye a la solución de diversas problemáticas (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2007):

- Determinan la importancia de las distancias de las calles y carreteras.
- Establece los parámetros necesarios para la determinación del nivel de servicio y las correspondientes especificaciones de un proyecto carretero.
- Permite evaluar de manera eficiente las deficiencias, a partir de una comparación de la geometría del proyecto y las especificaciones vigentes.
- A partir de la evaluación anterior, se pueden determinar los puntos de mejora y necesidades del proyecto.
- Finalmente, se puede lograr estimar el costo necesario para realizar una mejora al proyecto.

Así pues, los objetivos principales de contar con una clasificación funcional se enlistan a continuación (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2007):

- Establecimiento de sistemas integrados y funcionales que permitan agrupar todas las carreteras bajo una misma jurisdicción.
- Asignación de responsabilidades para cada clase de camino a nivel gubernamental.
- Agrupación de carreteras donde se requiera el mismo nivel de ingeniería y competencia administrativa.
- Ligar las especificaciones técnicas del proyecto por tipo de carretera.
- Establecimiento de bases para la implementación de la planeación en carreteras.

1.3.2 Clasificación de las carreteras por su importancia.

Dentro del contexto nacional, la red de carreteras con las que cuenta el país se desarrolló de forma gradual en el transcurso de los años. Actualmente dicha red permite comunicar a la mayoría del territorio mexicano por medio de los más de más de 330 mil kilómetros de caminos dentro de la República. En función de sus características e importancia, la red de carreteras nacionales se clasifica en Redes Federales y Estatales así como en caminos rurales y brechas mejoradas (SCT, 2016).

Redes Federales: Son las que reportan la mayor parte de desplazamiento de carga y pasajeros, se caracterizan por recorridos largos y están relacionadas con fines comerciales y económicos. La Red Federal se puede entender como el conjunto de vías de comunicación pavimentadas para satisfacer la demanda del tránsito del transporte terrestre. La seguridad y mantenimiento de esta infraestructura depende del Gobierno Federal ya que esta cruza el territorio de diferentes entidades federativas. Son vías de acceso controlado, por lo que no se tienen interrupciones en su recorrido con cruces a nivel o entronques perpendiculares, lo que permite un tránsito continuo y fluido de un punto a otro.

Redes Estatales: Son aquellas que permiten la comunicación regional para entrelazar distintos tipos de sectores, asegurando la integración de extensas áreas en diversas regiones. La longitud de estos caminos es menor que aquellos que forman parte de la Red Federal. Las Redes Estatales se construyen en su mayoría por la cooperación entre el Gobierno Federal y el Gobierno Estatal, mientras que su planeación, programación y mantenimiento dependen de la capacidad financiera de los gobiernos locales, los cuales remiten al Gobierno Federal los programas y acciones a realizar en la entidad.

Caminos rurales y brechas mejoradas: Se refieren a vías de comunicación de bajo costo, sin pavimentar y con escaso trabajo técnico cuyo valor más que económico es social. Estos caminos se distinguen por permitir la comunicación con comunidades de difícil acceso y por contar con carreteras revestidas. Aunque no cuentan con concreto o pavimento, estas vías de comunicación dan servicio en cualquier época del año y se distinguen por garantizar el paso de vehículos hacia las localidades rurales con poblaciones pequeñas. Tanto los caminos rurales como las brechas mejoradas refuerzan la comunicación regional y enlazan zonas de producción agrícola y ganadera (INEGI, 2014).

1.3.3 Clasificación administrativa de las carreteras

Para fines administrativos, la Red Carretera Mexicana también se puede clasificar de acuerdo con las dependencias de gobierno que tienen a su cargo la construcción, operación y conservación de dicha infraestructura. Administrativamente estas carreteras tienen la siguiente clasificación:

Carreteras Federales: a cargo de la Federación.

Carreteras estatales: a cargo de la Junta Local de Caminos.

Carretera vecinal: construida por cooperación de particulares beneficiados.

Carretera de cuota: a cargo de Caminos y Puentes.

De esta manera, la clasificación administrativa principalmente ayuda a tener un mayor control para su mantenimiento y conservación, cuya responsabilidad recae en las Secretarías y Juntas Locales (SCT, 2016).

1.3.4 Clasificación de las carreteras por su Tránsito Diario Promedio Anual

Atendiendo a sus características geométricas y de acuerdo al Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA) de una carretera, estas se clasifican de acuerdo a la SCT y a lo establecido en sus Normas de Servicios Técnicos dentro del apartado de proyectos geométricos de carreteras (Valdés Arias, 1990), como sigue:

Tipo ET4: Eje de transporte carretero de cuatro carriles.

Tipo ET2: Eje de transporte carretero de dos carriles.

Tipo A4: Carretera de cuatro carriles con TDPA de 5,000 a 20,000 vehículos.

Tipo A2: Carretera de dos carriles con TDPA de 3,000 a 5,000 vehículos.

Tipo B4: Carretera primaria de cuatro carriles con TDPA de 1,500 a 3,000 vehículos.

Tipo B2: Carretera primaria de dos carriles con TDPA de 1,500 a 3,000 vehículos.

Tipo C: Carretera secundaria de dos carriles con TDPA de 500 a 1,500 vehículos.

Tipo D: Carretera alimentadora de dos carriles con TDPA de 100 a 500 vehículos.

De lo anterior, la nomenclatura A, B, C, D y ET, corresponde a lo siguiente:

Carretera tipo ET: Se refiere a las carreteras que integran a los ejes de transporte establecidos por la SCT. Permiten la correcta operación de la totalidad de los vehículos autorizados incluyendo aquellos con valores máximos en cuanto a capacidad, peso y dimensiones.

Carretera tipo A: Se trata de carreteras con capacidad de operar con vehículos autorizados con valores máximos en cuanto a capacidad, peso y dimensiones, a reserva de aquellos que únicamente pueden transitar en las carreteras ET.

Carretera tipo B: De acuerdo con reglamento de pesos y dimensiones, se refiere a aquellas vías que constituyen a la red primaria de carreteras, siendo su principal función permitir una correcta comunicación interestatal.

Carretera tipo C: Se refiere a redes secundarias de longitud media, cuyo fin principal es permitir una correcta comunicación dentro de un estado, conformando de esta manera una red de conexión primaria.

Carretera tipo D: Son conocidas como redes o carreteras alimentadores, las cuales cubren principalmente distancias cortas y constituyen a una red de conexión secundaria, permitiendo de esta manera una comunicación eficaz en trayectos locales en un nivel de jerarquía municipal.

				TIPO DE CARRETERA																													
CONCEPTO		UNIDAD	E				D				C				B				A														
TDPA	EN EL HORIZONTE DEL PROYECTO	V*/h/día	HASTA 100				100 A 500				500 A 1500				1500 A 3000				MAS DE 3000														
TERRENO	MONTAÑOSO	-																															
	LOMERIO	-																															
	PLANO	-																															
VELOCIDAD DEL PROYECTO		km/h	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70	40	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	110	60	70	80	90	100	110	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA		m	30	40	55	75	95	30	40	55	75	95	40	55	75	95	115	135	155	55	75	95	115	135	155	175	75	95	115	135	155	175	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE REBASE		m	-	-	-	-	-	135	100	225	270	315	180	225	270	315	360	405	450	225	270	315	360	405	450	495	270	315	360	405	450	495	
GRADO MÁXIMO DE CURVATURA		°	60	30	17	11	7.5	60	30	17	11	7.5	30	17	11	7.5	5.5	4.3	3.3	17	11	7.5	5.5	4.3	3.3	2.8	11	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	
CURVAS	K	CRESTA	m/%	4	7	12	23	36	3	4	8	14	20	4	8	14	20	31	43	57	8	14	20	31	43	57	72	14	20	31	43	57	72
		COLUPIO	m/%	4	7	10	15	20	4	7	10	15	20	7	10	15	20	25	31	37	10	15	20	25	31	37	43	15	20	25	31	37	43
VERTICALES	LONGITUD MINIMA	m	20	30	30	40	40	20	30	30	40	40	30	30	40	40	50	50	60	30	40	40	50	50	60	60	40	40	50	50	60	60	
ANCHO DE LA CALZADA		m	4.0				6.0				6.0				7.0				A2				A4				AS						
			7				2 a 7				2 a 7				2 a 7				2 CARRILES				4 CARRILES				4 CARRILES						

Figura 1.4 Clasificación de carreteras por su TDPA (Valdés Arias, 1990)

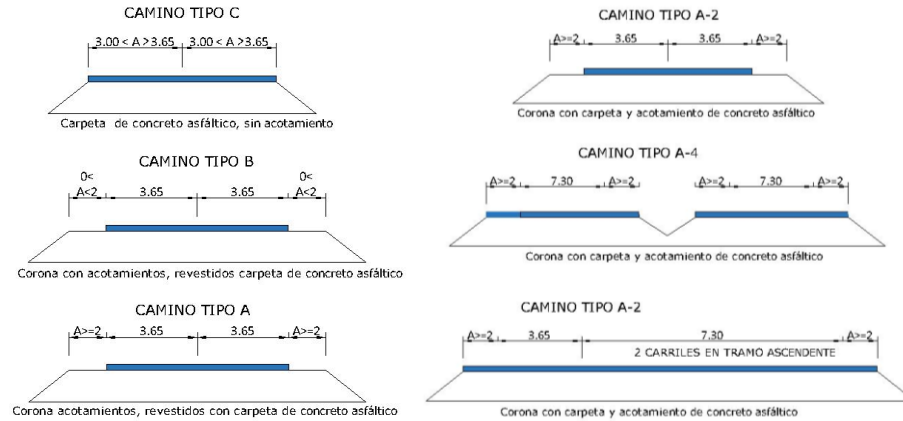


Figura 1.5 Clasificación de caminos SCT (SCT, 2012)

Es necesario mencionar que esta clasificación se da principalmente por sus especificaciones técnicas y por la cantidad de aforo vehicular para la que la carretera fue proyectada. De esta manera, dentro de este rubro las carreteras se clasifican tanto por el tamaño de vehículos, velocidad de desplazamiento, capacidad y tamaño de los caminos como se puede ver en las Figuras 1.4 y 1.5.

1.3.5 Clasificación de las carreteras por su transitabilidad

Esta clasificación se da en función de cómo se constituye la superficie de rodamiento de una carretera, la cual puede estar conformada por terracería, revestida o pavimentada (Castelán Sayago, 2008):

Carreteras de tierra o terracería: Aquellas donde la superficie de rodamiento se encuentra conformada por tierra, siendo estas transitables en temporadas secas, pero de difícil acceso en época de lluvias. (Ver. Figura 1.6).

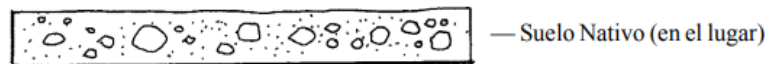


Figura 1.6 Ejemplo de camino de terracería (SCT, 2012)

Carreteras revestidas: Se trata de carreteras transitadas todo el tiempo, sin embargo, estas no se encuentran revestidas con pavimento o concreto sino con algún otro tipo de agregado pétreo simple. (Ver. Figura 1.7).

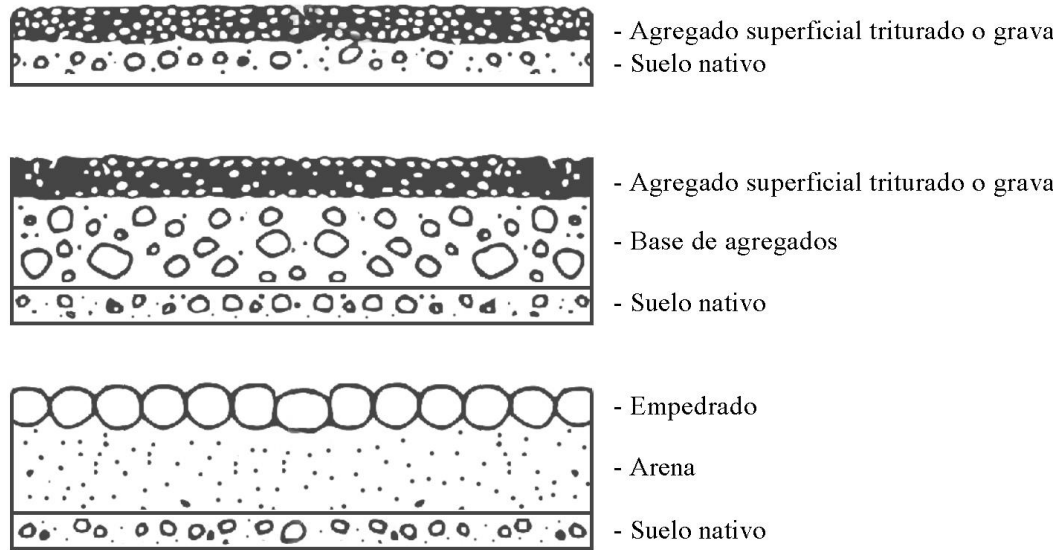


Figura 1.7 Tipos de revestimiento (SCT, 2012)

Carreteras pavimentadas: Corresponden a las carreteras que cuentan con una capa de tratamiento superficial, el cual puede estar conformado de asfalto o de concreto hidráulico. (Ver. Figura 1.8)



Figura 1.8 Ejemplo de sección transversal de una estructura de pavimento (Fuente: elaboración propia)

1.4 PRINCIPALES CARRETERAS DEL PAÍS

De acuerdo con el Anuario Estadístico de la SCT emitido en el 2015, las carreteras a cargo de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) que presentaron el mayor tránsito de vehículos en el periodo 2014 a 2015, fueron la México-Puebla, con 46,101 vehículos, mientras que la México-Querétaro reportó 42, 027, seguida de la Puebla-Orizaba con 22, 989 vehículos respectivamente (Ver Tabla 1.1).

Autopista / Carretera	Vehículos (miles)
México - Puebla	46,101
México - Querétaro	42,027
Puebla - Orizaba	22,989
Querétaro - Irapuato	21,807
Estación Don - Nogales	14,092
Tijuana - Ensenada	12,517
Ciudad Mendoza - Córdoba	11,327
Córdoba - Veracruz	10,122
Cuacnopalan - Tehuacán - Oaxaca	9,137
La Tinaja - Cosoleacaque	8,719
La Carbonera - Puerto México	5,228
Libramiento Oriente de Saltillo	4,603
Las Choapas - Ocozocuatla	4,326
Aguadulce - Cárdenas	3,494
Torreón - Saltillo	3,476
Durango Mazatlán	2,813
La Rumorosa - Tecate	2,512
Gómez Palacio - Corralitos	2,227
Reynosa - Matamoros	1,521
Tihuatlán - Gutiérrez Zamora	1,497
Salina Cruz - La Ventosa	1,248
Lagos de Moreno - San Luis Potosí	1,199
Rancho Viejo - Taxco	950
Aeropuerto Los Cabos	906

Tabla 1.1 Tránsito de vehículos en autopistas a cargo de CAPUFE (SCT, 2015)

Asimismo, entre las autopistas de cuota con mayor aforo vehicular reportadas en el anuario antes mencionado para el año 2015, destacan la México-Pachuca, con un TDPA de 70,720 vehículos, así como la México-La Marquesa con un TDPA de 57,258 vehículos, seguida por la México-Querétaro con 54, 815 vehículos, como se puede ver en la Tabla 1.2 (SCT, 2015).

Autopistas con mayor tránsito	Total (TDPA)	Automóviles	Autobuses	Camiones
México - Pachuca	70,720	61,714	3,938	5,068
México - La Marquesa	57,258	50,740	3,415	3,103
México - Querétaro	54,815	34,825	3,103	16,886
Chamapa - Lechería	51,869	46,484	360	5,025
México - Puebla	42,293	31,950	2,852	7,490
México - Cuernavaca	36,723	32,182	1,230	3,311
Guadalajara - Zapotlanejo	34,414	23,627	2,071	8,716
Puebla - Acatzingo	33,586	23,348	2,364	7,874
Peñón - Texcoco	30,693	26,833	1,460	2,399
Cd. Mendoza - Córdoba	30,693	18,809	1,826	7,702
Ecatepec - Pirámides	22,253	18,737	1,456	2,060
Querétaro - Irapuato	21,001	13,052	1,029	6,920
Cardel - Veracruz	17,273	12,838	894	3,541
Libramiento Oriente de San Luis Potosí	15,471	3,976	360	11,135
Libramiento Nororiente de Querétaro	15,173	6,030	554	8,589

Tabla 1.2 Jerarquización de las autopistas de cuota con mayor aforo vehicular por tipo de vehículo en 2015 (SCT, 2015)

De lo anterior se observa que tanto para las carreteras administradas por CAPUFE como para aquellas autopistas de cuota reportadas por la SCT, los tramos correspondientes a la carretera México-Querétaro, muestran una de las mayores densidades de vehículos con respecto al resto de las autopistas mencionadas en las Tablas 1.1 y 1.2, de esta manera, se confirma que el trayecto en cuestión se encuentra posicionado dentro de las carreteras más importantes y de mayor impacto a nivel nacional.

1.4.1 Corredor Carretero de México

Este corredor interconecta a las cinco mesorregiones de México, asimismo, permite el acceso y una correcta comunicación a los principales puntos del país desde las capitales de los estados hasta aeropuertos así como fronteras y ciudades con actividades relativas al turismo (Ver Figura 1.9). De manera particular, las mesorregiones que conforman a México son las siguientes (SCT, 2016):

Noroeste: Localizada en la parte noroeste de la República Mexicana; conformada por Baja California Norte y Sur así como Sinaloa y Sonora, con una superficie superior a los 380 kilómetros cuadrados.

Noreste: Conformada por Durango, Tamaulipas, Chihuahua, Nuevo León y Coahuila, es la mesorregión más con una superficie mayor a los 660 kilómetros cuadrados.

Centro-Occidente: Integrada por la mayoría de los estados del centro y occidente del país como San Luis Potosí, Guanajuato, Nayarit, Zacatecas, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes y Colima con una superficie superior a los 340 kilómetros cuadrados.

Centro país: Compuesta por el Estado de México, Tlaxcala, Querétaro, Hidalgo, Morelos y la Ciudad de México, con una superficie de casi 65 kilómetros cuadrados.

Sur-Sureste: Conformada por Quintana Roo, Campeche, Yucatán, Chiapas, Oaxaca, Tabasco, Veracruz, Guerrero y Puebla, cuenta con una superficie superior a los 500 kilómetros cuadrados.



Figura 1.9 Mapa de las Mesorregiones de México (SCT, 2019)

Es importante mencionar que dentro de los más de 50 mil kilómetros de red federal que existen en México, de acuerdo al transporte de pasajeros y mercancías registrado anualmente, es posible identificar 14 corredores carreteros o ejes troncales, que suman 20 mil kilómetros a lo largo del territorio nacional. Una vez ubicados estos corredores dentro de su distribución se puede apreciar la interconexión de las ciudades del centro del país, conectando al Distrito Federal con Guerrero, Morelos, Michoacán, Veracruz, Querétaro e Hidalgo. Al mismo tiempo, el corredor central se extiende de forma radial a los puertos o principales centros turísticos del centro del país, conectando también, a los golfos en ambos extremos (SCT, 2016).

Estos corredores comunican principalmente a las capitales la mayoría de los estados del país, las principales concentraciones metropolitanas, las ciudades de más relevancia, puertos marítimos de interés y además permiten el acceso a las diferentes fronteras internacionales con una mayor afluencia: la frontera con Estados Unidos, así como la frontera con Belice y Guatemala respectivamente. En la figura 1.10 se pueden observar los ejes troncales longitudinales y transversales de acuerdo con la Cámara Nacional del Autotransporte de Carga (CANACAR).



Figura 1.10 Mapa de los ejes transversales y longitudinales de México, así como los principales tramos del corredor carretero de México (CANACAR, 2016)

De igual manera, en la figura 1.10, se pueden apreciar las carreteras que conforman a los 14 corredores del Corredor Carretero de México, además, así como la distribución de la longitud de las carreteras donde se puede observar una mayor densidad de la red vial a lo largo de las zonas más desarrolladas del país.

Asimismo, el decimoquinto corredor se encuentra en desarrollo el cual conforma desde Tepic hasta Salina Cruz, mientras que el resto de los 14 corredores cuentan con un avance aproximado del 75%, de estos se conoce que el 45% de la carga carretera transportada a nivel nacional se transporta por tres de los corredores más importantes a nivel nacional, es decir, el corredor México-Nogales, el Altiplano y el México-Nuevo respectivamente (SCT, 2013).

Además del impacto socioeconómico generado por estos corredores, estos ejes han propiciado un gran crecimiento referente al sector turístico ya que la construcción y constante modernización de dichos corredores permite a sus usuarios desplazarse en trayectos más largos que comunican a los principales puntos turísticos de México en menor tiempo, permitiendo a su vez, una dinámica de movilidad eficiente.

Es importante resaltar que el valor que tienen estos corredores para México se puede medir a través del nivel de movilidad y el volumen de personas, además de la mercancía y servicios de transporte que día con día transitan y usan este medio como vía de comunicación. De esta manera, los corredores antes mencionados se pueden dividir en la red estatal y la red federal o básica. Así, la red estatal se encuentra conformada principalmente por carreteras estatales y caminos rurales, mientras que la red federal se integra por carreteras federales libres y de cuota.

Finalmente, para poder realizar una distinción entre los tramos federales o carreteras de la red básica nacional, se parte del supuesto de que dicha red asegura la comunicación directa entre entidades federativas además de conectar a las principales capitales estatales. De igual manera, la red básica es la que se encarga de garantizar un flujo vehicular continuo a través de los ejes troncales nacionales, es por eso que esta red debe de ser capaz de transportar un volumen de tránsito alto (Morales, 1999).

1.5 PRINCIPALES CARRETERAS DEL ESTADO DE MÉXICO

Referente a vías terrestres, el Estado de México es uno de los estados mejor comunicados ya que en su territorio se originan arterias importantes que comunican a la entidad con la capital del país y con el resto de los estados de México, las cuales se dividen en:

Zona este: Se cuenta con las Carreteras Federales libres y de cuota números 15 y 15D México-Toluca, que enlazan las localidades de San Mateo Atenco y La Marquesa con la Ciudad de México y Toluca de Lerdo. Así como las Carreteras Federales libres y de cuota números 190 y 150D que comunican a la entidad con los estados de Tlaxcala y Puebla respectivamente. De igual manera se pueden mencionar las carreteras de cuota 15D México-Toluca que conectan a Nezahualcóyotl, Los Reyes Acaquilpan, Chalco y San Martín Texmelucan.

Zona noreste: Se cuenta con la Autopista Federal de cuota número 134 Cuajimalpa-Naucaupan, que une a Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla y Ciudad Adolfo López Mateos, así como la Autopista Federal de cuota número 132D Ecatepec-Teotihuacán.

Zona norte: La entidad cuenta con la Carretera Federal libre y de cuota número 55 Toluca-Querétaro, que comunica a la ciudad de Toluca de Lerdo con Atlacomulco además de San Juan del Río y Querétaro.

Zona noroeste: En esta zona se encuentra la Autopista Federal de cuota número 15D Atlacomulco-Maravatío que conecta a la entidad con Guadalajara y Morelia, así como la Carretera Libre 14 Villa Victoria-EI Oro de Hidalgo la cual facilita la comunicación entre la capital del estado y estos dos municipios.

Zona oeste: Se cuenta con la Carretera Federal libre de peaje número 15, que comunica a la capital mexiquense con Zinacantepec, Zitácuaro, Ciudad Hidalgo y Morelia, entre otros. De igual manera, es importante mencionar que existen otras carreteras de gran relevancia a nivel nacional pero que solamente cruzan la entidad mexiquense, como es el caso de la Autopista Federal de cuota número 57D México-Querétaro, cuyo cadenamiento inicial comienza en Cuautitlán Izcalli y termina en el estado Querétaro de Arteaga.

1.5.1 Principales ejes carreteros del Estado de México

Las principales carreteras tanto Federales como Estatales, que forman parte de la red carretera del Estado de México, son aquellas que conectan al centro del país y son utilizadas por personas que se desplazan en su mayoría para llegar hasta sus lugares de trabajo, seguidas por aquellos vehículos que forman parte de una red de transporte de insumos y productos varios. Cabe destacar que estas vialidades también son la entrada y salida a la Ciudad de México y cuentan con un aforo vehicular, generalmente mayor durante los periodos vacacionales.

A continuación, se enlistan los principales ejes carreteros de la entidad, de acuerdo a la Junta Local de Caminos del Estado de México (Ver Figura 1.11 y Tabla 1.3):

No.	Eje Carretero	Longitud	TPDA	Jurisdicción	Tipo
I	México - Querétaro	147.9	15,070	Federal	Cuota
II	México - Pachuca	39.4	21,816	Federal	Cuota
II	México - Puebla	46.1	17,036	Federal	Cuota
IV	Toluca - Atlacomulco	50.1	6,374	Federal	Cuota
V	Atlacomulco - Maravatío	25.2	3,850	Federal	Cuota
VI	Chamapa - lechería	19.2	11,590	Federal	Cuota
VII	Tenango - Ixtapan de la Sal	42.7	5,904	Estatal	Cuota
1	Toluca - Cd. Altamirano	148.06	5,300	Estatal / Federal	Libre
2	Toluca - Morelia	71	9,620	Estatal / Federal	Libre
3	Toluca - Axixintla	99	6,810	Estatal / Federal	Libre
4	Toluca - Naucalpan	67	13,675	Estatal / Federal	Libre
5	Toluca - Palmillas	131.5	6,374	Estatal / Federal	Libre
6	México - Toluca	33	11,590	Estatal / Federal	Libre
7	México - Cuautla	51.9	16,729	Federal	Libre
8	Km. 34.4 (México - Toluca) - Tenango	39.8	5,011	Estatal	Libre
9	Toluca - Palmillas - Jilotepec - Corrales	65.4	6,845	Estatal	Libre
10	Tlalnepantla - Villa del Carbón - Atlacomulco	132	4,031	Estatal	Libre
11	Toluca - Tenango	46.2	4,500	Estatal	Libre
12	lechería - Cuautitlán - Zumpango - Apaxco	51.5	8,409	Estatal	Libre
13	Tejupilco - Amatepec - Tlatlaya.	25	4,280	Estatal	Libre
14	México - Tulancingo	25	4,280	Estatal	Libre

Tabla 1.3 Principales ejes de carreteras del Edo de México (Junta de Caminos del Estado de México, 2018)



Figura 1.31 Principales ejes de carreteras del Edo de México (Junta de Caminos del Estado de México, 2018)

Los caminos que atiende el Estado de México, son rehabilitados a través de la Junta de Caminos del Estado de México y el Sistema de Autopistas, Aeropuertos, Servicios Conexos y Auxiliares del Estado de México (SAASCAEM). Por una parte, aquellos que dependen de la Junta de Caminos (Ver Figura 1.12), suman un total de 4,326.67 km de red, los cuales se encuentran divididos en 4,032.97 km de caminos pavimentados y 293.70 km de caminos revestidos. Mientras que el SAASCAEM atiende 393.10 km. de autopistas. (Junta de Caminos del Estado de México, 2018).

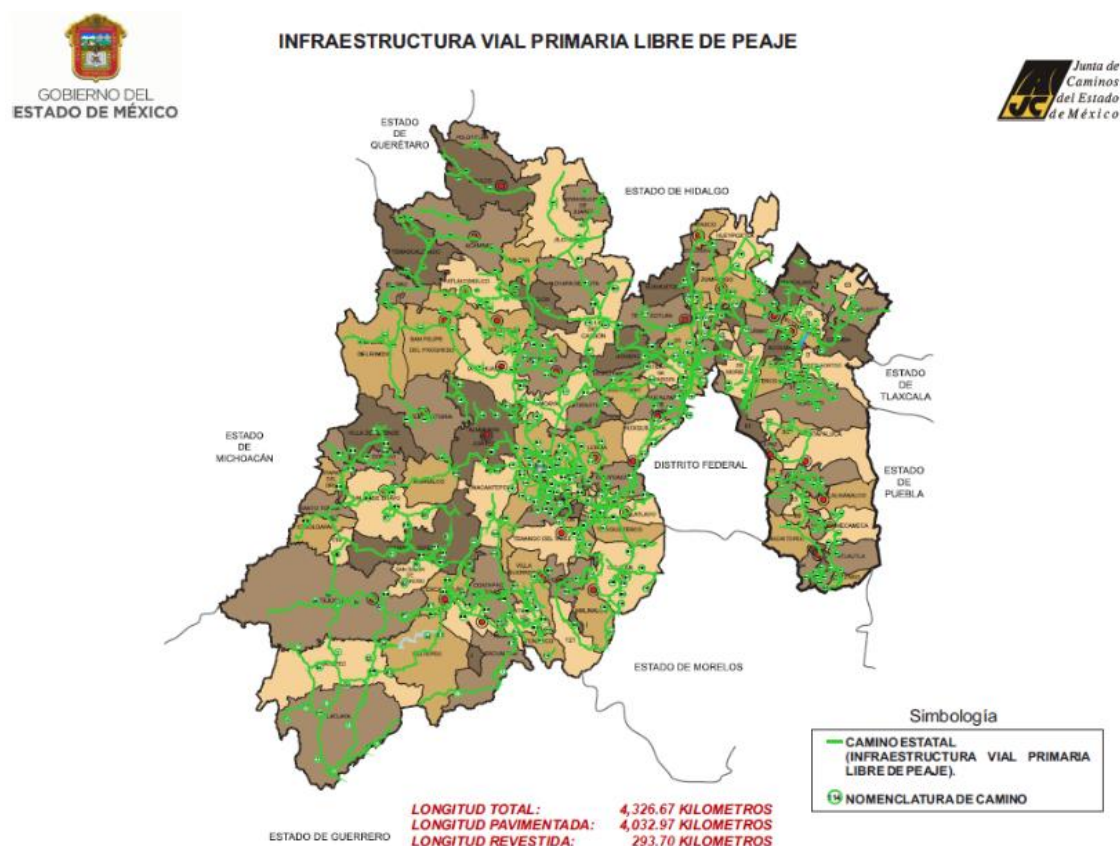


Figura 1.42 Infraestructura vial primaria libre de peaje del Edo de México (Junta de Caminos del Estado de México, 2018)

Cabe destacar que el crecimiento de las carreteras del Estado de México sigue impulsando nuevos proyectos para conectar los principales nodos logísticos del estado y del país, de tal manera que actualmente se encuentran en desarrollo proyectos de gran relevancia nacional, los cuales mejorarán las condiciones del servicio del Corredor Carretero de México en un mediano plazo.

Entre los principales proyectos que se encuentran en desarrollo a nivel estatal, se encuentran:

- Actualización de la carretera México-Puebla.
- Actualización de la carretera México-Pachuca.
- Construcción de la Autopista La Marquesa - Toluca.
- Nueva Autopista Chalco-Cuatla.
- Segundo piso del Periférico de la CDMX a la Caseta de Tlalpan.
- Nuevo Viaducto de la Unidad Interlomas.
- Nuevo Aeropuerto Internacional de México.
- Tren México Toluca, Estado de México.
- Distribuidor 5 de mayo, Metepec Estado de México.
- Libramiento de Acambay, Estado de México.
- Distribuidor Vial Ixtapaluca.
- Boulevard Aeropuerto-Naucalpan.
- Distribuidor Vial Santa Lucía.
- El Arco Norte.
- Distribuidor Vial Palmira.
- Libramiento de Cuernavaca.
- Carretera La Pera-Cuatla.
- Autopista Siglo XXI.
- Ampliación de la Plaza de Cobro Tlalpan.

Estas obras buscan que el estado cuente con mejores opciones de integración y acceso al mercado, como es el caso de la ampliación a la autopista Arco Norte, que de manera particular ha sido referente para la logística y el transporte a nivel nacional, ya que ha permitido integrar de mejor manera la región central del estado, favoreciendo el desarrollo económico, industrial y social de la entidad. Otro ejemplo dentro del Estado de México es el libramiento Acambay que cuenta con 13.3 kilómetros de longitud y que reduce el recorrido Toluca-Palmillas de 2 horas 15 minutos a poco más de 1 hora, mejorando la conectividad de esta región con el estado de Querétaro y, que a su vez, forma parte del Corredor México-Nuevo Laredo, siendo este último uno de los principales corredores del país al conectar la Ciudad de México con la frontera norte y Estados Unidos (SCT, 2018).

Todos los proyectos antes mencionados, atienden la necesidad de una alta demanda de tránsito generada por la dinámica de un crecimiento nacional constante a través de varios indicadores como lo son el aumento de la velocidad de operación, la reducción de los tiempos de recorrido así como de los costos de operación de los diferentes tipos de vehículos y, sobre todo, le brindan seguridad a los usuarios disminuyendo la ocurrencia de accidentes por maniobras de rebase y cruces, ya que el aforo vehicular actual supera las especificaciones de la infraestructura vigente.

1.6 DEFINICIÓN DE RED CARRETERA

Una red carretera es el conjunto de vías de comunicación destinadas al tránsito de vehículos, donde se incluyen los servicios e infraestructura carretera auxiliar así como el derecho de vía referente a las mismas (Diario Oficial de la Federación, 2009), cuando estas se encuentren bajo alguno de los siguientes supuestos:

- a) Intercepte con uno o más caminos fuera del país.
- b) Comuniquen a las diversas entidades federativas.
- c) Exista una aportación total o parcial por parte del Estado.

En México, la Red Carretera Federal cuenta con aproximadamente 50,000 kilómetros, divididos en 145 rutas. Dichas rutas se encuentran conformadas a su vez por 876 carreteras constituidas por cerca de 2,800 tramos carreteros. (Caso Lombardo, 2016).

Conocer el volumen y el aforo vehicular de una carretera, permite identificar su nivel de utilización, así como las condiciones de operación de cada uno de los tramos o subtramos que la conforman. De esta manera, el análisis en el comportamiento de estas vías de comunicación es indispensable para determinar no sólo algunas tendencias relativas al incremento en su uso sino para lograr una correcta planeación, buscando de esta manera que siempre se garantice la mejor experiencia para el usuario. Asimismo, este análisis permite determinar el comportamiento de la carretera ante una captación para aforos vehiculares más altos, dando como resultado programas de mantenimiento y modernización o actualización de infraestructura (SCT, 2017).

1.7 RESUMEN

Las carreteras se han convertido en el apoyo fundamental de los sistemas de intercambio más demandantes de una actividad humana cada vez más compleja siendo el enlace entre el ámbito rural y el ámbito urbano uno de sus papeles principales.

El constante desarrollo de las vías terrestres se explica en gran parte por la naturaleza y la dinámica de los procesos económicos y sociales de un país, ya que estos tienden a tomar en cuenta sus repercusiones en los costos tanto de transporte de productos y usuarios finales. La generación de empleos y las líneas de distribución moldean día a día el comportamiento de una red carretera, generando nuevos proyectos que buscan mejorar las condiciones de servicio actuales de la infraestructura nacional.

En México, los 14 ejes principales que conforman al Corredor Carretero Nacional, influyen de manera determinante en la economía, movilidad y en los tiempos de desplazamiento entre sus entidades. A lo largo de los años, la economía de México ha crecido exponencialmente propiciando un gran desarrollo carretero, permitiendo comunicar al sector agrario, ganadero, industrial y turístico. Además ha logrado que cerca de estas carreteras se desarrollen diversas zonas industriales siendo un ejemplo claro de esta dinámica es el estado de Querétaro, derivado de las múltiples inversiones Federales e Interestatales que han construido y mejorado en el país en materia de vías terrestres.

Ahora bien, las carreteras son las arterias de un país sin ellas no habría desarrollo ni integración. La infraestructura carretera no sólo comunica sino también elimina los desequilibrios regionales, impulsa el desarrollo y mejora la calidad de vida, acerca a la población a los diferentes sectores de salud, educación y en sí al progreso.

La Red Carretera Nacional facilita la movilización de mercancías y bienes a través de importantes corredores troncales y transversales que están interconectados y que contribuyen a transformar a México, en una plataforma logística para el comercio internacional. Desde esta perspectiva es importante visualizar el porqué de los desplazamientos de la población pues estos son los responsables de moldear la demanda que se genera en una vialidad.

CAPÍTULO 2

LA INTERRUPCIÓN DEL SERVICIO DE UNA RED CARRETERA

2.1 ANTECEDENTES

El crecimiento de una red carretera y el uso cada vez más intenso al cual se encuentra sujeto este tipo de infraestructura, obliga a brindar una mayor atención a su mantenimiento, razón por la cual se ha buscado implementar programas de conservación de carreteras. Dentro de estos, algunos promueven la reconstrucción de las redes carreteras por haber sido construidas inicialmente con limitaciones técnicas y presupuestales de su época, mientras que otras requieren de la implementación de una completa modernización (SCT, Modernización del sistema carretero troncal visión a 2010 y 2020, 1999).

Referente al estado actual de la Red Federal de Carreteras esta presenta diversas problemáticas ligadas al estado físico de la misma y a las deficiencias de su infraestructura, así como las limitaciones geométricas y de capacidad de gran parte de los corredores carreteros más representativos del país. Por otra parte, esta red cuenta con una cobertura limitada en cuanto a caminos rurales y carece de un mecanismo de planeación operativa y de conservación. En la actualidad, y como se muestra en la Figura 2.1, las condiciones físicas en que se encuentra la Red Federal de Carreteras se visualiza de la siguiente manera:

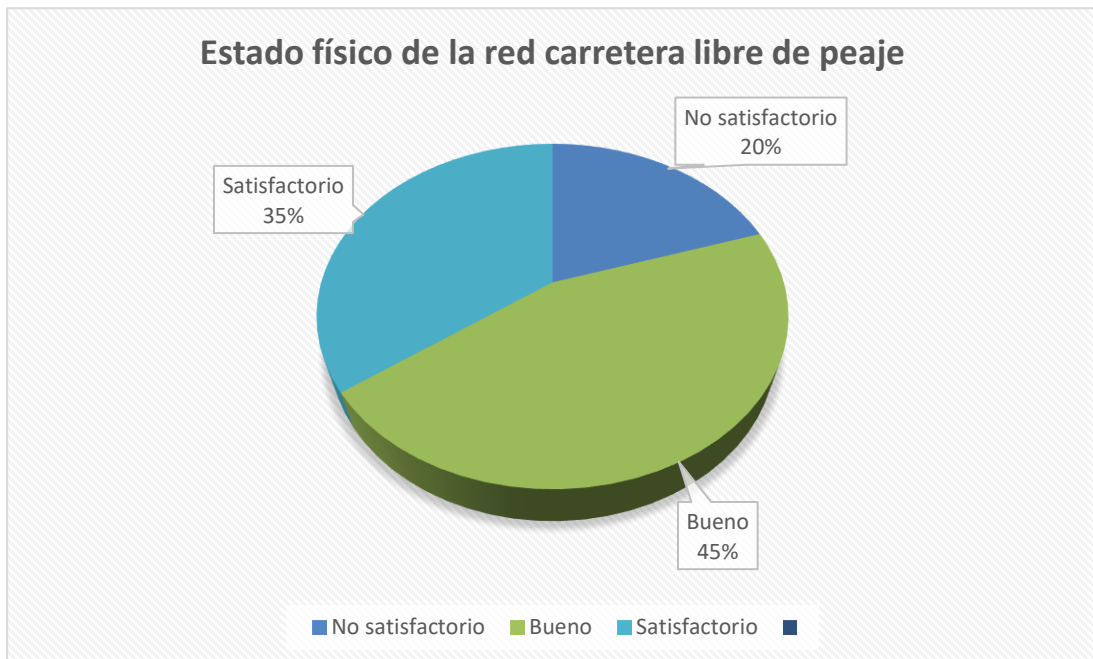


Figura 2.1 Gráfica del estado de la red carretera libre de peaje (SCT, 2015)

Las necesidades de esta red son atendidas por la SCT, dependencia responsable de desarrollar programas de conservación y mantenimiento rutinario, con el fin de garantizar condiciones óptimas de servicio. Una vez identificados los tramos más deteriorados, se brindan recursos para la reconstrucción de dichas carreteras, con el objetivo de rehabilitar tramos que presenten daños importantes y mejorar sus condiciones de servicio. Existen diferentes programas para la evaluación y rehabilitación de caminos, los cuales tienen como finalidad determinar cuáles resultan más representativos desde el punto de vista, político, social y económico.

En cuanto al aspecto económico, el análisis del funcionamiento de una red carretera se puede realizar mediante la determinación de los enlaces carreteros necesarios para el correcto desarrollo de los diversos centros de producción de la región, facilitando de esta manera el abastecimiento de las concentraciones de consumidores, en función de las actividades económicas de los sectores agrícola, ganadero, pesquero, industrial, comercial, educativo y turístico, entre otros. De esta manera, es posible determinar la importancia de una carretera de acuerdo a las actividades económicas antes mencionadas y su trascendencia a nivel nacional, estatal y local. Con respecto a la inversión necesaria para rehabilitar un tramo carretero, resulta necesario priorizar la aplicación del recurso ya que, si la inversión se realiza en una zona con cierto grado de desarrollo, el beneficio para los usuarios será mayor comparado con el producto de aplicar el mismo recurso en una zona en vías de desarrollo o en proceso de incorporación a la economía del mercado. De acuerdo al Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, la SCT divide a las carreteras en tres grandes grupos en función del impacto de su inversión y operación (SCT, 2018):

Carreteras de función social: Aquellas en las que la consecuencia de su inversión se refleja principalmente en el ámbito social y su concentración de población. El criterio para su evaluación es el número de beneficiarios o habitantes por servir.

Carreteras de penetración económica: Aquellas donde su inversión tiene un impacto principal en la incorporación de la región involucrada al proceso de desarrollo, generalmente estas carreteras se pueden encontrar en zonas industriales o productivas económicamente. El criterio de evaluación para esta clasificación se realiza con base al cálculo de la producción que será agregada a la economía nacional.

Carreteras para zonas en pleno desarrollo: Ubicadas en zonas donde ya existen vías necesarias para prestar servicios de transporte, aptas para ser sustituidas por infraestructura de mayores especificaciones. El criterio para la evaluación de estas carreteras se realiza con base al índice de rentabilidad de la inversión propuesta.

Para cada una de las carreteras antes mencionadas, la unidad de medida y la cuantificación de los beneficios obtenidos es diferente, sin embargo, las problemáticas y causas de su interrupción resultan recurrentes.

Debido a su extensión y a la calidad que brinda a sus usuarios, la infraestructura carretera nacional es uno de los patrimonios más valiosos con los que cuenta el país, ya que aunada a su sistema vial, ambas representan en gran medida el grado de desarrollo de México, dado que la calidad de la infraestructura carretera con la que cuenta un país es uno de los principales indicadores de su desarrollo. Por esto resulta vital darse a la tarea de buscar acciones de mejoramiento y mitigación de los impactos negativos en carreteras, con el objetivo de garantizar no sólo la integridad de los usuarios sino el correcto funcionamiento del sistema vial puesto que, un programa de mantenimiento deficiente o a destiempo, puede generar una interrupción en el correcto transporte de bienes y servicios.

En el caso de México, el país cuenta con diversos programas de mantenimiento implementados por la SCT, así como una guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras (SCT, 2014). Aún bajo esta dinámica de mejoramiento constante de las redes carreteras del país se siguen presentando diversas interrupciones en el servicio de la red carretera nacional, ya que la mayoría de las recomendaciones existentes contemplan técnicas tradicionales propiamente para conservación de tramos carreteros que requieren de un futuro mantenimiento, o bien, que sugieren la implementación de diversas innovaciones tecnológicas para el mejoramiento o mitigación del daño en la superficie de rodamiento de caminos.

Sin embargo, las principales causas de estas interrupciones no se deben al estado de la infraestructura ni se pueden evitar aún con un programa de mantenimiento que cumpla con los más altos estándares puesto que la mayoría se deben a los efectos que se generan en las carreteras derivados de fenómenos naturales y condiciones socio-organizacionales difíciles de predecir.

2.2 CAUSAS DE LA INTERRUPCIÓN DEL SERVICIO DE UNA RED CARRETERA

Generalmente las labores de mantenimiento que tienen como fin el mejoramiento del servicio que ofrece la infraestructura vigente de una red carretera, brindan beneficios a largo plazo, es por eso que los retrasos generados en los tiempos de recorrido y los congestionamientos que ocurren a corto plazo suelen dejarse de lado porque los periodos de mantenimiento son poco relevantes en cuanto a su duración.

Por otra parte, estos trabajos de rehabilitación no son informados con anticipación a los usuarios por lo que estos se ven obligados a esperar, en consecuencia, la mayoría de las veces se tiene la incertidumbre de la existencia de rutas alternas factibles y es esta misma incertidumbre la que estimula la desconfianza en que el tiempo de espera será reducido, optando en la mayoría de las veces por continuar con el recorrido original.

Sin embargo, pueden ocurrir fenómenos que alteren el funcionamiento o los niveles de servicio de una red, estas anomalías pueden generarse por alteraciones provocadas por la naturaleza y/o el ser humano e impactan negativamente en el funcionamiento cotidiano de la red. Los fenómenos antes mencionados son tratados como agentes perturbadores de acuerdo al Manual de Protección Civil del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), mismos que pueden ser emergencias, siniestros o desastres.

Aunque esta perspectiva está planteada para cualquier tipo riesgo poblacional, la mayoría de estos agentes es aplicable para el caso de la interrupción de carreteras, es por eso que se decide tomar este enfoque para poder lograr una clasificación inicial de las causas que pueden generar una interrupción del servicio en una red carretera.

2.2.1 Agentes perturbadores

De acuerdo a su origen, los agentes perturbadores se pueden clasificar en naturales (Geológicos, Hidrometeorológicos) y Antrópicos (Químico-Tecnológicos, Sanitario-Ecológicos y Socio-organizativos) (Coordinación General de Protección Civil del Estado de México, 2014).

Visto desde otra manera, un fenómeno perturbador se puede entender como un acontecimiento que puede impactar de manera negativa tanto la población como al entorno de un sistema, el cual es sujeto de cambios; de esta manera el sistema transforma su estado normal a un estado de daños, los cuales pueden llegar a un grado de desastre, donde se supone la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y/o extremos (Diario Oficial de la

Federación, 2014). Si se visualiza a una red carretera como un sistema, esta puede ser afectada por diversos agentes como sismos, huracanes, incendios, etcétera. Particularmente, la Coordinación General de Protección Civil del Estado de México y el CENAPRED, clasifican estos fenómenos en agentes geológicos, hidrometeorológicos, químico-tecnológicos, sanitario-ecológicos, socio-organizativos (Diario Oficial de la Federación, 2014):

Fenómenos Geológicos: Agentes perturbadores causados directamente por movimientos en la corteza terrestre. Entre estos, se encuentran la inestabilidad de laderas y taludes, sismos, tsunamis y erupciones volcánicas además de los deslizamientos hundimientos, agrietamientos entre otros.

Fenómenos Hidrometeorológicos: Generados por diversos factores atmosféricos, entre los que se encuentran tormentas, ciclones, tornados, lluvias extremas, inundaciones, tormentas de nieve, sequías y heladas, entre otros.

Fenómenos Químico-Tecnológicos: Causados por la acción de sustancias derivadas por el efecto de una interacción violenta de sustancias, dentro de estos agentes perturbadores podemos encontrar los incendios, radiaciones, explosiones, derrames y fugas tóxicas.

Fenómenos Sanitario-Ecológicos: Generados por la acción de patógenos y agentes biológicos cuya principal afectación se genera en los seres vivos y cosechas, causando estragos en la salud de la población como epidemias y desastres sanitarios.

Fenómenos Socio-Organizativos: Generados por acciones premeditadas o por algún error humano cuyas consecuencias derivan en concentraciones o movimientos sociales. Como parte de estos agentes perturbadores se tienen las manifestaciones, vandalismo, sabotaje, terrorismo, así como accidentes terrestres, marítimos y aéreos.

Es importante mencionar que el grado de afectación en la infraestructura carretera es diferente para cada tipo de agente en particular, es por eso que, para fines prácticos y para el caso de una red carretera, objeto de estudio del presente trabajo, se propone clasificarlos en aquellos ligados a fenómenos naturales y a fenómenos organizativos y/o sociales.

2.2.1.1 Fenómenos naturales

En los últimos años, la situación climatológica de México ha sufrido diversos cambios que han impactado tanto a los ecosistemas como a la infraestructura nacional. De manera general, los eventos climáticos extremos (Ver Figuras 2.2 y 2.3), han generado efectos negativos para

el país, los cuales se pueden traducir en pérdidas anuales que han alcanzado más de 3 mil millones de dólares tan sólo para el periodo 1996-2015 (Mendoza *et al.*, 2017).

A partir de la recopilación de información realizada en el periodo de 1970 a 2013 y gracias a la utilización de una herramienta de software denominada Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar), se han podido identificar las eventualidades climáticas más frecuentes relacionadas al transporte en México (Ver Tabla 2.1).

Evento	Registros entre 1970 y 2013, relacionados al transporte
Inundación	518
Deslizamiento	380
Lluvia	277
Vendaval	237
Tempestad	234

Tabla 2.1 Eventos climáticos más frecuentes en México (Mendoza *et al.*, 2017)



Figura 2.2 y 2.3 Eventos climáticos extremos en carreteras (Mendoza *et al.*, 2017).

A continuación, se hace una breve mención de los fenómenos naturales más frecuentes en nuestro país de acuerdo con la Publicación Técnica No.498 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), además de algunas de las recientes afectaciones de estos fenómenos a la infraestructura vial del Estado de México.

A) Inundaciones y lluvias

Las afectaciones derivadas por inundaciones (Ver Figura 2.4), se refieren a aquellas donde la infraestructura vial, principalmente carreteras y puentes, se ve involucrada en el desbordamiento de ríos o escurrimientos superficiales, quedando obstruida de manera parcial o total el tránsito por las vías terrestres. Para el caso de las afectaciones generadas por las lluvias (Ver Figura 2.5), estas indican de igual manera daño en puentes e implican el cierre del tránsito o interrupción temporal del servicio, así como la pérdida de infraestructura (Mendoza *et al.*, 2017).



Figura 2.4 Cierre por inundación de la México-Toluca en el kilómetro 24+500, marzo de 2018 (Becerril, 2018)



Figura 2.5 Cierre por lluvia de la México-Toluca en el kilómetro 24+500, marzo de 2018 (Notimex, 2018)

B) Deslizamientos

Los deslizamientos de tierra (Ver Figuras 2.6 y 2.7), se encuentran estrechamente ligados a la ley de gravedad y ocurren generalmente dada la existencia de pendientes pronunciadas, o bien, cuando hay una falta en la consolidación de la litología en suelos con existencia de rocas. Generalmente, el deslizamiento de material sobre una vía terrestre se debe a la saturación de un estrato de suelo, lo que vuelve inestable a los taludes que envuelven a la superficie de rodamiento de un camino, obstruyendo de esta manera el paso a través de la vía por derrumbe o deslave de material sobre la superficie de rodamiento del camino (Mendoza *et al.*, 2017).



Figura 2.6 y 2.7 Ejemplo de deslizamiento (El Sol de Toluca, 2018)

De manera general, estos desplazamientos suelen ser una causa común del cierre o bloqueo temporal de las carreteras, sin embargo, la remoción de escombros y la corrección de esta interrupción tienden a ocurrir en un periodo de tiempo corto. Los deslizamientos de taludes (Ver Figuras 2.8 y 2.9), tanto artificiales como naturales, dependen principalmente de dos factores, es decir, de la pendiente con la que cuenta la estructura y de su factor de inestabilidad. Aun cuidando estos aspectos, la estabilidad de un talud puede disminuir al ser afectada por alguna carga externa, al remover material de la base, o bien, cuando el material por el cual se compone se ve saturado (Keefer, 1984).

Además de esto, es importante considerar que el deslizamiento de un talud puede estar ligado también a la filtración de agua o cambios en la vegetación del lugar, pues de esta manera se reduce la estabilidad del terreno al disminuir su cohesión. De igual manera, uno de los principales factores que determinan la estabilidad de un talud es la configuración estructural del sitio donde se encuentra ubicado, pues esta es determinada en función de la existencia de fallas y fracturas (Cruz Castillo & Delgado Argote, 2000).



Figura 2.8 Deslave y cierre total de la autopista México-Querétaro en el kilómetro 52+900 (El Universal, 2015)



Figura 2.9 Deslizamiento y cierre parcial en la carretera México Toluca por deslave en el kilómetro 22+500 (El Universal, 2017)

Finalmente, es de vital importancia recordar que los deslizamientos están ligados generalmente a zonas de climas como el cálido húmedo y semihúmedo, sin dejar de lado las zonas templadas y áridas en menor medida. De manera particular en 1999, la mayor parte del territorio nacional se vio sujeta a altas precipitaciones pluviales originadas por diversas depresiones tropicales lo que causó daños derivados por inundaciones al Estado de México y la Ciudad de México, Puebla, Hidalgo, Veracruz, Tabasco, Campeche y Chiapas, entre otros. Esto se debió a que las lluvias extraordinarias en las regiones montañosas de las zonas antes mencionadas tuvieron un gran impacto en las cuencas de la región ya que saturaron el suelo que cubre las formaciones rocosas de las montañas, generaron un aumento en el peso volumétrico del mismo y disminuyeron su resistencia, provocando a su vez derrumbes de rocas, deslizamientos de laderas y desbordamiento de ríos, cuyos daños fueron estimados en más de 200 millones de dólares (Cuanalo *et al.*, 2006).

C) Ondas frías

Una onda de frío se puede catalogar como un fenómeno meteorológico derivado del enfriamiento en el aire, distinguido por una onda determinada por la velocidad a la que cae la temperatura y su valor mínimo. La temperatura mínima en cuestión se encuentra en función de la región geográfica en estudio y de la época del año, lo que puede ocasionar que este fenómeno cause impactos significativos a los ecosistemas (Mendoza *et al.*, 2017).

Para el caso de las vías terrestres, en condiciones extremas estas ondas afectan significativamente tanto a los usuarios como a los vehículos automotores, además a los

materiales que constituyen la carpeta de rodamiento del sistema vial ya que generan efectos adversos como nevadas, granizo, heladas, niebla, vendavales, entre otros.

De manera particular, en el Estado de México las ondas frías históricamente han afectado representativamente a la entidad (Ver Figuras 2.10 y 2.11), principalmente con granizadas en la parte centro-norte del estado, obligando un cierre total en diferentes tramos de la carretera panamericana, principalmente los tramos de la carretera México-Toluca, Toluca-Palmillas y Arco Norte, dejando a los usuarios varados por más de 12 horas (Excelsior, 2014).

Sin embargo, en la totalidad de los casos, se ha logrado restaurar parcialmente la circulación con apoyo de la policía federal y local así como también por parte de los ayuntamientos de los municipios afectados.



Figura 2.10 y 2.11 A la izquierda, el cierre por granizo de 15cm de espesor de la México-Toluca en el kilómetro 28+000, enero de 2018 (El Financiero, 2018). A la derecha, el cierre total por granizo de la México-Toluca en el kilómetro 38+000, abril de 2014 (Excelsior, 2014)

D) Ondas de calor

Las altas temperaturas pueden ocasionar impactos adversos en la infraestructura carretera, de esta manera se puede generar un deterioro superficial en el pavimento y la generación de roderas (Ver Figura 2.13). Aunque estos efectos pueden corregirse a través de un mantenimiento rutinario (Ver Figura 2.14), es decir, a partir de un adecuado bacheo y de la aplicación habitual de riegos de sello, las temperaturas extremas pueden causar daños diversos que van desde afectaciones a la estructura del pavimento hasta limitaciones a las actividades de construcción, sobrecalentamiento de los vehículos afectados, aumento en el consumo de combustibles, desgaste de neumáticos así como una mayor incidencia de incendios forestales (Ver Figura 2.12) e incluso el mal funcionamiento en los circuitos del señalamiento vial (Mendoza *et al.*, 2017).



Figura 2.12 Cierre parcial y nula visibilidad por incendio en la carretera Chamapa-Lechería en el kilómetro 5+000, marzo de 2018 (Excelsior, 2018)



Figura 2.13 y 2.14 Cierre parcial por rehabilitación de la carretera Federal 57, Tramo Palmillas-Querétaro con un costo aproximado de 750 millones de pesos, enero de 2018 (Velásquez Ramírez, 2018)

2.2.1.2 Fenómenos organizativos y/o sociales

De acuerdo a la SEGOB, este tipo de fenómenos se refiere a aquellos sucesos generados por acciones premeditadas o derivadas de errores humanos, los cuales originan grandes concentraciones sociales o movimientos masivos de personas. El campo de estudio de los riesgos socio-organizativos es muy limitado, sin embargo, la mayoría de estos se refiere a las problemáticas sociales producto de diversos tipos de desastres así como la respuesta de la población a los mismos (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2016).

En este apartado se analizan tres de los principales fenómenos socio-organizativos que afectan al transporte de bienes y servicios en carreteras, o bien, al correcto funcionamiento de estas vías de comunicación como lo son las fallas humanas o accidentes, las concentraciones masivas de población y el vandalismo.

A) Errores humanos y accidentes

Actualmente, los accidentes son una de las principales problemáticas socio-organizativas a tal grado de ser considerados como un problema de salud pública puesto que representan una causa frecuente de mortalidad y/o morbilidad a nivel nacional y cuyo impacto en el país, genera altas pérdidas económicas y sociales causadas por el alto número de heridos y decesos presentados en la infraestructura carretera de manera particular. Estudios realizados indican que para reducir el número de accidentes viales se necesitan tomar en cuenta diversas consideraciones como una participación efectiva del usuario, mayor seguridad de los vehículos, adecuaciones a la legislación y su vigilancia, así como garantizar las condiciones que permitan una operación óptima del sistema vial (Birh, 2011).

Dada una concentración de accidentes en intersecciones y el paso de la población, el papel del proyectista resulta indispensable ya que con objeto de equilibrar las demandas de tránsito en cuanto a volumen, velocidad, características de aceleración y desaceleración, este debe tomar como premisa la seguridad en todas las nuevas construcciones y rehabilitaciones de calles, avenidas y carreteras, cumpliendo con la normatividad pertinente (Ver Figura 2.15), para garantizar la seguridad en la operación del tránsito vial (SCT, Normas y procedimientos de conservación y reconstrucción de carreteras, 1971).

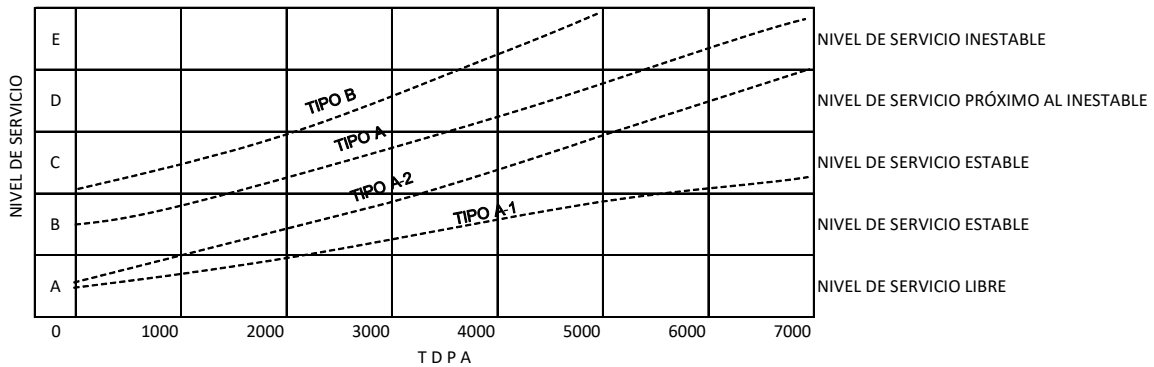


Figura 2.15 Indicadores de estabilidad de caminos en función a su TDPA (SCT, Normas y procedimientos de conservación y reconstrucción de carreteras, 1971)

En el diseño de carreteras se considera que el conductor de un vehículo tiene dos limitantes principales las cuales resultan en condicionantes del proyecto y que son de suma importancia, con base en la clasificación y tipo de camino de acuerdo a su TDPA. Dichas limitantes son la visión y el tiempo de reacción:

Visión: Las carreteras deberán proyectarse como mínimo en base a la distancia de visibilidad de parada o de encuentro. Bajo el supuesto de que el sentido de la visión requiere de tiempo para realizar sus funciones, un conductor requiere entonces de aproximadamente un segundo para poder desarrollar cualquier maniobra básica al volante. De igual manera, a medida que la velocidad aumenta, el conductor enfoca su vista a una mayor distancia a partir del punto de referencia, restringiendo en gran medida la visibilidad lateral, lo que comúnmente se conoce como visión de túnel. Asimismo, durante la noche y en condiciones de baja iluminación, se genera un efecto de deslumbramiento que generalmente aumenta el tiempo de reacción del conductor.

El tiempo de reacción: Se trata del tiempo en el que el conductor logra generar una respuesta adecuada a un estímulo visual, auditivo o cinético. El tiempo de reacción es distinto para cada conductor en función de sus aptitudes así como de condiciones externas. Bajo el supuesto de que el conductor puede tomar una sola decisión por cada estímulo percibido, el proyectista deberá evitar escenarios donde sea necesario tomar múltiples decisiones, o bien, donde una decisión inmediata afecte acciones subsecuentes o genere distracciones.

Entidad Federativa	Longitud de la red	Veh/km (millones)	Accidentes			Saldos		Daños materiales (mdp)
			Total	con muertos	con heridos	muertos	heridos	
República Mexicana	55,134,437.00	166,997.41	12,553.00	2,573.00	5,130.00	3,371.00	11,163.00	1,015.09

Tabla 2.2 Accidentes de tránsito reportados en la república mexicana durante 2016 (Cuevas et al., 2016)

Incluso contemplando estas limitantes, resulta evidente que los accidentes son sucesos imprevistos, los cuales dependen principalmente de la estrecha relación que existe entre el camino, el vehículo y el usuario, generando pérdidas materiales y, en la mayoría de los casos, humanas (Ver Tabla 2.2).

Una vez ocurrido un accidente de gran magnitud, la única alternativa para regresar una vía a sus condiciones óptimas de operación es realizar un cierre parcial o total de la misma, en tramos o seccionamientos de las carretera de acuerdo a la magnitud del percance, sin embargo, esto representa consecuencias inminentes a los usuarios, objeto de estudio de la presente investigación.

B) Demostraciones de inconformidad social y concentraciones masivas de población

Se trata de los fenómenos socio-organizativos más comunes y que afectan principalmente a los asentamientos con mayor densidad de población como ciudades o capitales. Sin embargo, estos fenómenos pueden suceder también en poblaciones más pequeñas cuando, derivado de algún evento, se congrega un número considerable de habitantes (Figuras 2.16 a 2.21).



Figura 2.16 y 2.17 Cierre total de la carretera Toluca-Tenango en el km. 14+500 ocasionado por bloqueo de Antorcha Campesina, febrero de 2018 (El Sol de Toluca, 2018)



Figura 2.18 y 2.19 A la izquierda, más de 200 personas bloquean la Toluca-Palmillas en el kilómetro 90+000 tras atropellamiento de un vecino en Acambay. A la derecha, liberación de la vía horas después tras haberse formado filas de más de 5km (El Sol de Toluca, 2017)



Figura 2.20 Manifestaciones recurrentes de transportistas en el tramo Toluca-Palmillas (Fuente: elaboración propia)

A manera de ejemplo se pueden mencionar las peregrinaciones (Ver Figura 2.21), las cuales son muy comunes a nivel nacional y que alteran el orden vial además de estar ligadas a accidentes o cambios en el comportamiento vial de un tramo carretero, ya que no se cuenta con un carril confinado para estas eventualidades, además de realizarse sin la vigilancia y supervisión necesarios.



Figura 2.21 Efecto de las peregrinaciones en el tramo Toluca-Palmillas (Fuente: elaboración propia)

C) Vandalismo

Este aspecto se refiere principalmente a los actos en contra de las personas, de los bienes públicos o privados o servicios públicos que ocasionan una perturbación del orden público. En el caso de las vialidades, el vandalismo se puede observar principalmente por la destrucción o inhabilitación de la infraestructura de carácter estratégico o indispensable para la provisión de bienes o servicios públicos. De igual manera, los bloqueos de vialidades principales por parte del crimen organizado están incluidos en esta sección (Ver Figuras 2.22 y 2.23).



Figura 2.22 y 2.23 Narco bloqueos en la zona centro y norte del país (Nexos, 2017)

2.3 CONSECUENCIAS DE LA INTERRUPCIÓN DEL SERVICIO

2.3.1 Factor humano

Es un hecho que la Red Federal de Carreteras permite la correcta comunicación entre los diversos nodos estratégicos del país, sin embargo, resulta necesario mencionar que muchos de los tramos por los que se encuentra constituida, cuentan actualmente con un alto nivel de saturación por el constante incremento en el número de usuarios de estos, fenómeno evidente en los nodos cercanos al centro del país. Aunado a esto, existen problemas de conexión a escala local denominadas de "último kilómetro", como lo son accesos a puertos, cruces internacionales y entradas a las ciudades. El factor humano, que se define como la contribución de la naturaleza humana en el desarrollo de una difusión o falla técnica de la infraestructura, es uno de los principales insumos para la planeación de una vía carretera ya que en función de las consecuencias esperadas de este factor se pueden proyectar acciones a realizar dentro de la etapa de diseño (SEGOB, 2018).

Como parte del factor humano, se puede considerar que el error de operación de un conductor es el primer paso en una cadena de acciones que pueden desencadenar un accidente. Asimismo, este error durante la conducción puede ser causado por la falta de interpretación de la información en la interacción entre el conductor y la carretera. En la mayoría de los casos, esta falla puede ser corregida de forma inmediata sin ser identificados a simple vista, requiriendo de instrumentos de medición especiales para su observación. Si bien el correcto diseño de una infraestructura vial refuerza las medidas de seguridad y educación vial, es indispensable mencionar que resulta imposible evitar en su totalidad los riesgos relacionados con el factor humano. En esta parte, la SCT y CAPUFE manejan diversas plataformas de alerta de causas de cierre en carreteras nacionales (Ver Figura 2.24).

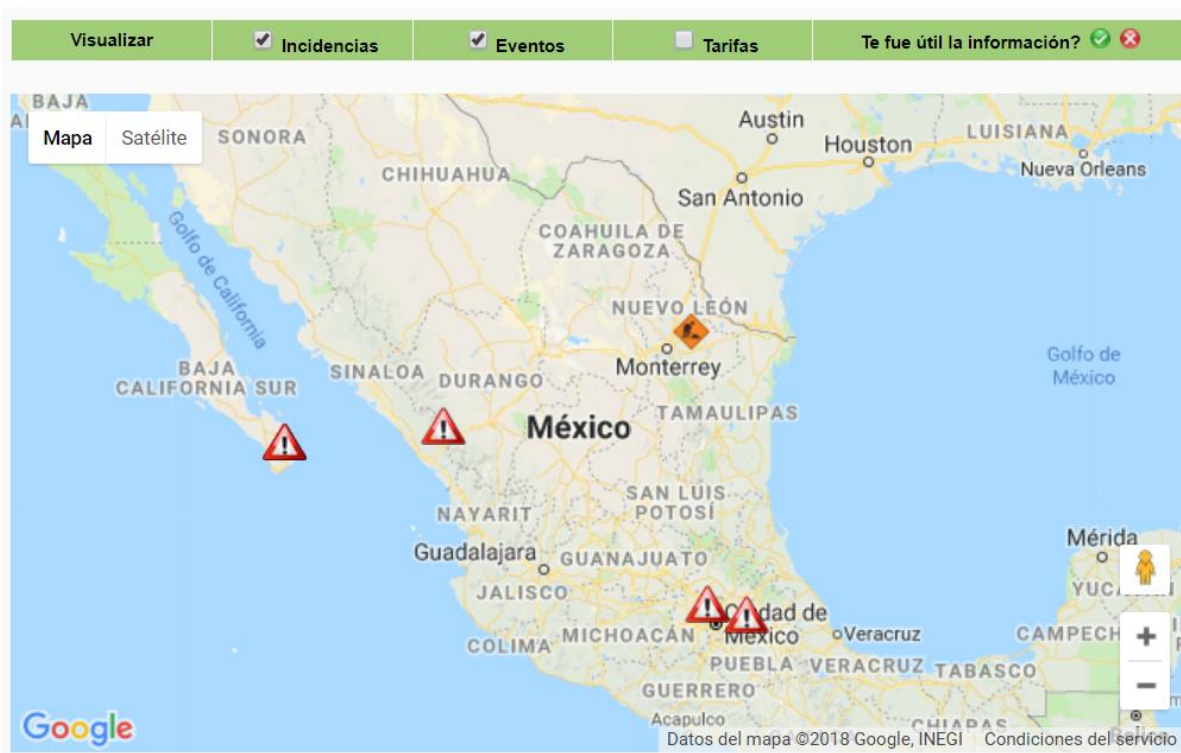


Figura 2.24 Ejemplo de alertas emitidas en el portal de rutas punto a punto y Traza tu Ruta (SCT, 2017)

En el portal se puede observar que la mayoría de los cierres reportados donde se realiza una interrupción parcial o total del servicio es causada por trabajos de mantenimiento y rehabilitación, los cuales suelen prolongarse propiciando la ocurrencia de accidentes, a su vez, derivado de la modificación en las condiciones habituales de las rutas que los usuarios utilizan en sus trayectos, los cuales en su mayoría se realizan por motivos de trabajo.

2.3.2 Factor medio ambiente

Respecto al medio ambiente, es necesario considerar que el clima tiene un efecto considerable en la infraestructura carretera, ya que de este dependen aspectos que van desde la planeación, construcción, operación y conservación de la misma. De manera general, el cambio climático se considera como un factor de riesgo para los responsables de la administración de una red carretera, quienes deberán de tomar en cuenta este fenómeno para garantizar un correcto funcionamiento futuro de la infraestructura.

Dentro de la etapa de diseño, para la conformación de la infraestructura carretera, se consideran aspectos del medio ambiente como lo son el clima y, de manera específica, el diseño de carreteras se basa en parte, en el registro histórico del clima, aunque los diversos cambios climáticos de los últimos años hacen que este parámetro sea cada vez menos confiable. En su mayoría, la infraestructura vial está diseñada para ofrecer un buen servicio durante la vida útil para la cual fue proyectada, por lo que entender el comportamiento del clima puede beneficiar el rendimiento de las carreteras a largo plazo.

Eventos climáticos más frecuentes en México		
Cantidad	Motivo	No. Evento
1	Inundación	518
2	Deslizamiento	380
3	Lluvias	277
4	Vendaval	237
5	Tempestad	234

Tabla 2.3 Eventos climáticos más frecuentes registrados entre 1970 y 2013 en México (DesInventar, 2018)

Como se puede ver en la Tabla 2.3 se describen los eventos climáticos más frecuentes en el país y además se observa que en el periodo de 1970 a 2013 las principales afectaciones generadas en caminos, carreteras y puentes durante esos años han sido causadas por escurrimientos superficiales y/o desbordamientos que han impedido de manera parcial o total el acceso a diversos tramos carreteros. Por otra parte, los deslizamientos ocupan el segundo lugar de eventualidades y estos generalmente ocasionan obstrucciones en caminos y carreteras derivados de deslaves o derrumbes de material sobre la infraestructura vial. Una vez ocurrido el deslizamiento se deben de realizar diversos trabajos de mantenimiento que permitan la reanudación del servicio, sin embargo, algunas ocasiones es necesario recurrir a un cierre temporal para poder reconstruir parte de la infraestructura dañada.

Así pues, para el caso de los vientos fuertes o vendavales estos se asocian principalmente a la interrupción del servicio ocasionado al quedar obstruidas las vías de comunicación la caída de objetos como ramas y troncos así como de señales viales o anuncios espectaculares que suelen ceder bajo el efecto de vientos extremos. La mayoría de los registros ocasionados por el efecto del viento se potencian con la ocurrencia de huracanes y tornados donde generalmente se ocasiona un daño severo tanto a puentes como a la carpeta asfáltica de un tramo carretero ocasionando, de igual manera, un cierre parcial que deriva en la suspensión total del servicio durante el periodo de reconstrucción necesario.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS

En materia ambiental y referente a la afectación de un servicio, la Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC) y el CENAPRED, clasifican las consecuencias que pudieran derivar en un cierre de carreteras de acuerdo con tipo de fenómeno que las origina, como se puede apreciar en la Tabla 2.4:

Servicio	Posibles causas de interrupción	Principales consecuencias	Sectores más afectados
Agua	Fenómenos de origen natural, fallas en el suministro de energía eléctrica, escasez por falta de precipitación y captación, fugas, sobreexplotación de los mantos acuíferos, desperdicio e ineficiencia en la distribución y consumo, así como contaminación	Conflictos sociales, problemas sanitarios, aumento en los índices de mortalidad infantil, mayor riesgo de enfermedades diarreicas y víricas, pérdida y muerte de cultivos y ganado, muerte de personas a consecuencia de enfermedades relacionadas con el agua, etcétera.	Población en general Salud Agropecuario Industria Comercio y servicios Medio ambiente
Energía	Fenómenos de origen natural, actos de sabotaje, falta de mantenimiento a las instalaciones, errores humanos, escasez de combustibles	Afectaciones en bombas para suministro de agua y combustibles, interrupción de actividad industrial, descomposición de productos perecederos, suspensión de actividades económicas, interrupción de algunas actividades recreativas, impacto directo en la prestación de servicios de salud, etcétera	Industria Comercio y servicios Turismo Salud Transporte
Transporte	Fenómenos de origen natural, errores humanos, desabasto de combustibles, falta de suministro de energía eléctrica, accidentes de transporte, daños en infraestructura carretera, labores de mantenimiento	Movilidad de la población, afectación en sectores económicos, desempleo, concentraciones masivas de población, conflictos sociales, desabasto de productos básicos, caída de la actividad turística, etcétera	Transporte Industria Comercio y servicios Turismo Empleo
Abasto en alimento y combustible	Daños en infraestructura carretera, escasez de alimentos y combustibles, especulación en materias primas y de primera necesidad y compras de pánico	Conflictos sociales, desnutrición, pérdidas económicas significativas en industria, comercio y servicios, aumento de precios en artículos de primera necesidad, crisis energética, migración, hambrunas	Población en general Salud Industria Comercio y servicios Turismo

Tabla 2.4 Consecuencias de la interrupción de diversos servicios, entre los que destaca la infraestructura carretera (CENAPRED, 2016)

2.4.1 Movilidad de la población

Se refiere principalmente a la afectación en sectores económicos, el desempleo, concentraciones masivas de población, conflictos sociales, desabasto de productos básicos, caída de la actividad turística, etcétera. Uno de los principales parámetros para medir este aspecto es el índice de movilidad que se refiere al número promedio de desplazamientos de las personas. Este indicador permite conocer la relación entre las características sociales de una población en particular como el nivel de educación, edad, género y ocupación, con las características económicas, es decir, el ingreso de la población y su movilidad.

Es importante mencionar que de acuerdo a un estudio realizado por el Banco de Desarrollo de América Latina en las principales ciudades de nuestro país y del continente, en lo referente a desplazamientos de los usuarios, la proporción de desplazamientos por habitante en viajes motorizados, como lo son automóviles, motocicletas, autobuses y trenes, supera en más del doble a aquellos desplazamientos realizados en medios no motorizados, siendo el caso de viajes a pie o en bicicleta (Banco de Desarrollo de América Latina, 2010).

La interrupción parcial o total de una vía de transporte, genera una modificación en los índices de movilidad de la población es por eso que resulta indispensable contar con una infraestructura carretera en buen estado que garantice a los usuarios poder desplazarse a su lugar de destino sin contratiempos.

2.4.2 Congestionamientos

Otro de los aspectos en los que incide el estado de la infraestructura vial es evidentemente en el nivel de congestionamiento de una carretera, el cual se encuentra ligado a su vez a los tiempos de recorrido de los usuarios, el confort y la seguridad de la infraestructura. Cabe mencionar que de esta manera la incorporación consecutiva de vehículos a una vía terrestre reduce en gran medida la velocidad promedio de recorrido por lo que se necesitará una mayor cantidad de tiempo para recorrer un trayecto en particular en caso de una congestión. Ahora bien, dado un incremento en el número de vehículos que circula por una carretera y este supera la capacidad de la misma, aparecerán problemas relacionados con la congestión vehicular.

Es importante mencionar que aunque la mayor parte de su vida útil, la infraestructura vial no trabaja a su máxima capacidad, existen diversas eventualidades que pueden llegar a ocasionar una interrupción parcial o total del servicio las cuales pueden ser ocasionadas,

como ya se vio en el apartado 2.2, por diversos agentes como los geológicos, hidrometeorológicos, químico-tecnológicos, sanitario-ecológicos y socio-organizativos que pueden desencadenar a su vez una congestión vehicular por el cese del servicio (Diario Oficial de la Federación, 2014).

Ahora bien, resulta indispensable comentar que independientemente de los agentes antes mencionados, la ocurrencia de eventualidades como lo son las temporadas vacacionales, las festividades regionales, los festivales, entre otros, puedan generar que los volúmenes de tráfico aumenten de manera considerable en una infraestructura y superen las especificaciones para las cuales fue diseñada, ocasionando también un congestionamiento vehicular. (Burzaco Samper, 2007).

2.4.3 Seguridad

Como parte fundamental del diseño de la infraestructura vial se deben cuidar en gran medida los aspectos relativos a la seguridad que tienen como fin evitar la mayor cantidad de accidentes posibles. Sin embargo, aun cumpliendo con los estándares más exigentes y la normatividad vigente, la mayor parte de los accidentes en una carretera son ocasionados por el factor humano, como ya se revisó en el apartado 2.3.1.

Una manera directa de medir la seguridad de una infraestructura vial es tomando como parámetro la cantidad de accidentes ocurridos en la misma durante un periodo de tiempo determinado, de esta forma se pueden obtener información útil referente a los saldos por tramo en un tramo o cadenamiento de un camino de interés.

De manera particular, a nivel nacional existen diversos anuarios estadísticos los cuales muestran la cantidad de accidentes en carreteras donde se suelen reportar las pérdidas materiales, heridos y pérdidas de vidas humanas (Cuevas *et al.*, 2016).

En México, la SCT por medio de la Dirección General de Servicios Técnicos, se encarga de integrar la estadística referente a los accidentes de tránsito reportados dentro de la Red Carretera Federal, siendo la dependencia responsable de llevar tanto el registro así como el análisis y el tratamiento de los datos, los cuales son proporcionados por la policía federal de caminos. Esta importante actividad tiene como finalidad la identificación de los sitios con altos índices de accidentes, las principales causas así como los saldos de estas eventualidades las cuales se reportan en términos de pérdidas materiales y humanas. Una vez recabada esta información es canalizada a las áreas encargadas de la conservación de carreteras para

conformar programas de mantenimiento y rehabilitación de vías prioritarias además para la implementación de programas de prevención de accidentes (SCT, 2018).

2.5 CUANTIFICACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS

Conviene subrayar que la interrupción del servicio ocasionará que los vehículos involucrados permanezcan encendidos un mayor tiempo, o bien, recorran mayores distancias para lograr llegar a su destino por medio de rutas alternas que suplan a la principal generando a su vez un aumento en las emisiones de contaminantes a la atmósfera y contribuyendo al deterioro climático del planeta. Este deterioro climático, puede llegar a ser tan representativo como incluso ser equivalente a la pérdida del 5% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial anualmente de acuerdo al Informe Stern (HM Treasury, 2006), mientras que para México el cambio climático le cuesta al año aproximadamente el 6% del PIB (Galindo, 2010).

Por otra parte, se cuentan con registros de la inversión que el país ha destinado a la rehabilitación del sector carretero derivado de eventualidades climáticas que han ocasionado la interrupción de diferentes tramos a nivel nacional. En esta parte, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) a través del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) genera un registro anual de las aportaciones emitidas por el fondo a las diversas entidades del país para combatir los estragos ocasionados por diversos desastres naturales en el interior de la República Mexicana. De acuerdo a su última actualización, particularmente para el sector carretero, el FONDEN destinó más de 458 mdp para el programa nacional de conservación de carreteras de acuerdo al plan de trabajo de la SCT para 2019 y cuya coparticipación asciende a un monto total de 15,900 mdp de acuerdo a la subsecretaría de infraestructura de la misma dependencia (SCT, 2019).

De acuerdo con la SCT, que es la dependencia responsable de garantizar el correcto funcionamiento de la infraestructura vial nacional, el presupuesto anual solicitado en el ejercicio 2019 para el mejoramiento del estado físico de la Red Carretera Nacional en mal estado asciende a 7,094 mdp de los cuales se destinaron 234 mdp para la reconstrucción de 44km de carretera y 6,860 mdp para la conservación periódica de 4,221 km de tramos de carreteras federales. Por otra parte, para el mantenimiento de la red carretera nacional, en el mismo ejercicio fiscal se ejercieron 3,406 mdp de los cuales se destinaron 3,120 mdp para la conservación rutinaria de 40, 590 km de carretera y 286 mdp para la conservación exclusiva de 7,948 puentes reportados en mal estado (SCT, 2019).

De no garantizarse el objetivo anterior, es decir, al no mantener la Red Carretera Nacional en buen estado, se podrán ocasionar percances o accidentes los cuales generarán pérdidas materiales además de heridos e incluso pérdidas humanas. Respecto a esta problemática el IMT recopila información registrada por la policía federal para conformar anuarios estadísticos, de donde se puede obtener el monto al que ascienden dichas pérdidas materiales ocasionadas por accidentes dentro de la red carretera federal. Para el caso particular del año 2015, se reportaron 17,241 percances que dejaron un saldo de 3,546 pérdidas humanas y 15,727 heridos, mientras que los daños materiales ascendieron a 1,192 mdp (Cuevas *et al.*, 2016).

2.6 RESUMEN

La interrupción de las vialidades en México y otros países se da principalmente por dos factores: la intervención de la naturaleza y el factor humano. Ahora bien, el alcance de esta interrupción depende en gran medida de la importancia de la vialidad y de la duración del mantenimiento o rehabilitación necesarios para la reanudación del servicio. Respecto a la parte económica, el cierre de una carretera implica consecuencias que afectan directamente al consumidor, por lo que resulta prioritario atender la problemática de manera inmediata, sin embargo, la falta de planeación o la deficiencia en los programas de mantenimiento vial aunado a errores humanos que resultan impredecibles pueden ocasionar que las acciones necesarias para la reanudación en el servicio se prolonguen por horas o incluso días completos.

Resulta imposible evitar en su totalidad el efecto que los agentes perturbadores tienen sobre el correcto funcionamiento de la infraestructura vial ya que durante su vida útil esta se encuentra expuesta a diferentes problemáticas, relacionadas principalmente a las condiciones geográficas y climatológicas de la región. Sin embargo, es necesario no perder de vista que justamente esta es la función principal de una vía terrestre, es decir, dicha infraestructura debe de ser capaz de facilitar la comunicación entre dos regiones o centros de población donde previamente no se contaba con este servicio, por lo que aun cuando gran parte de la infraestructura nacional carretera se encuentra en zonas de difícil acceso y bajo condiciones climáticas desfavorables, el beneficio que esta brinda a la población supera en creces los costos derivados del mantenimiento necesario para su correcto funcionamiento.

Bajo el supuesto de que el contexto climático nacional se encuentra en una dinámica constante de cambio es necesario considerar que la infraestructura vial estará sujeta a una mayor exposición y efectos de fenómenos climáticos los cuales no se consideran en las etapas correspondientes a la planeación y el diseño de estas obras civiles. De esta manera, el impacto climático podrá afectar en un futuro no muy lejano al sistema de carreteras nacional en función del grado de exposición y sensibilidad a los agentes perturbadores presentes en la región, lo cual se traducirá de manera evidente en un incremento en los costos de mantenimiento y reparación de los activos carreteros de la red de transporte del país.

Ahora bien, dada la interrupción del servicio de un tramo carretero no se debe perder de vista que los principales afectados son los usuarios ya que, durante el periodo de mantenimiento y sus trabajos derivados, se interrumpirán los trayectos cotidianos de estos provocando congestiones en calles y vías rápidas, lo que generará, a su vez, un aumento en los tiempos promedio de recorrido o incluso podrá ocasionar que dos zonas de interés queden incomunicadas en caso de los trabajos necesarios para reanudar el servicio se prolonguen.

Es necesario comentar que, junto con los efectos antes mencionados, una interrupción prolongada del servicio también puede ocasionar que los recorridos se vuelvan menos placenteros y más peligrosos. Por otra parte, se tiene que las condiciones del aforo vehicular a nivel nacional han cambiado drásticamente en los últimos años y dicho aumento en el tráfico ha obligado a mejorar las especificaciones de la infraestructura vial, permitiendo de esta manera la incorporación de una mayor cantidad de vehículos a la red, cuyas características también han ido cambiando a lo largo de los años en función de los reglamentos vigentes de pesos y dimensiones. Asimismo, las velocidades de proyecto en función de las especificaciones de la vialidad han incrementado para permitir una comunicación más inmediata, sin embargo, estas mejoras implican de manera indirecta un aumento en el riesgo derivado por el factor humano, ya que mayores velocidades de recorrido así como vehículos de mayor tamaño o incluso exceso de dimensiones exigen reacciones más precisas e inmediatas por parte de los conductores ante estos estímulos, además de aquellos externos y ajenos a las especificaciones de la infraestructura.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 RESUMEN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

La presente metodología tiene como objetivo cuantificar las diferentes consecuencias originadas a partir de la interrupción del servicio de una red carretera, las cuales pueden ser causadas por diferentes eventualidades como desastres naturales, condiciones climatológicas adversas, accidentes vehiculares, entre otros (Gradilla Hernández *et al.*, 2011). La propuesta se realiza bajo el supuesto de la interrupción del servicio de la red sin importar la causa que la origina o su probabilidad de ocurrencia.

Una vez generada la afectación y con el objetivo de un mejor entendimiento sobre el efecto adverso de la interrupción, las consecuencias ocasionadas se agrupan después de una revisión ardua de la literatura existente referente al tema de estudio para llegar finalmente al establecimiento de una clasificación con lo cual se proponen cinco grandes grupos conformados por las consecuencias socioeconómicas, operacionales, ambientales, materiales y humanas, además de aquellas generadas por las tarifas derivadas de la utilización de rutas alternas que involucran peaje.

3.2 CONSECUENCIAS SOCIOECONÓMICAS

Bajo el supuesto de que los afectados viajan por motivos de trabajo para generar una derrama económica, las consecuencias de esta interrupción pueden derivar en la pérdida de voluntad para trabajar, disminución en el rendimiento laboral, mal humor en el trabajo, etc. Para fines del trabajo se cuantifican únicamente las consecuencias socioeconómicas más relevantes como es el caso de las pérdidas ocasionadas por el aumento en el tiempo de traslado durante el trayecto hasta el lugar de destino así como las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados.

En otras palabras, el modelo numérico propuesto cuantifica las horas-hombre efectivas que laborarán los afectados durante el periodo de mantenimiento o rehabilitación de la ruta principal ya que, diariamente, tendrán que utilizar una ruta alterna hasta que la ruta óptima o principal opere normalmente. Estas horas-hombre no laboradas tienen un costo equivalente y se cuantifican no solamente aquellas horas perdidas derivadas del incremento del tiempo necesario para llegar a sus destinos por medio de la ruta alterna sino también aquellas dejadas de trabajar ocasionadas por el desgaste de los usuarios al pasar un mayor tiempo en sus vehículos.

A continuación, se describen los modelos propuestos para la cuantificación de las consecuencias antes citadas para lograr un mejor entendimiento y una diferenciación entre estos dos efectos.

3.2.1 Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento de tiempo de traslado

Bajo el supuesto de la interrupción del servicio de una vía carretera que va del punto “A” al punto “B”, los usuarios tendrán que buscar una ruta alterna. A su vez, las diferentes características de la ruta alterna generan tiempos de recorridos distintos.

Al utilizar una ruta alterna, los usuarios generalmente tardarán más tiempo en llegar a sus destinos, a reserva de que la ruta alterna elegida sea de mejores especificaciones comparada con la ruta óptima o principal, sin embargo, esto involucra en su mayoría de las veces, costos extras por peaje.

El modelo descrito a continuación, toma en cuenta el número de vehículos que transita sobre la ruta en estudio de acuerdo al TDPA, la distribución del aforo vehicular observada, el número de personas promedio por vehículo y la velocidad promedio por tipo de vehículo en la ruta en cuestión además de la distancia entre los puntos “A” y “B”.

Cabe mencionar que la velocidad promedio propuesta por tipo de vehículo, fue obtenida a partir del Índice Internacional de Rugosidad (IIR) y del tipo de terreno observado, utilizando los valores reportados para velocidades de operación por el IMT en la publicación técnica N° 471 (Arroyo Osorno *et al.*, 2016), sin embargo, se recomienda que las velocidades ingresadas al modelo numérico sean lo más cercanas a la realidad, es decir, sean obtenidas por medio de la realización de un aforo vehicular en los tramos de interés, procedimiento que queda fuera del alcance del autor derivado de los elevados costos de este tipo de estudios.

A partir de la distancia del tramo de interés y de la velocidad de cada vehículo involucrado se obtiene el tiempo que tarda cada vehículo en llegar a su destino, este se multiplica por el número de vehículos estimado que pasará por la ruta y a su vez por el número de pasajeros promedio, procedimiento que se utiliza tanto para la ruta principal como para la ruta alterna.

Finalmente, para obtener en términos monetarios el valor de la diferencia de tiempo entre las dos rutas, esta se multiplica por el valor de tiempo por motivo de trabajo (SHP) (Torres, Hernández, & González, 2016).

Por otra parte, el tiempo empleado por los usuarios para llegar del punto “A” al punto “B” propuesto está en función la distancia recorrida, clasificación, velocidad y número de personas promedio que utilizan cada vehículo, entre otros:

$$T = f(d, i, j, v, u, N, IIR, T_t) \quad (1)$$

Donde:

T	(s)	Tiempo total transcurrido para llegar del punto “A” a “B”
d	(km/veh)	Distancia total recorrida por vehículo
i		Indicador de la ruta alterna en estudio
j		Tipo de vehículo (Clasificación SCT)
v	(km/hr)	Velocidad promedio por tipo de vehículo
u	(pers/veh/día)	Usuarios promedio por tipo de vehículo por día*
N	(veh/día)	Número de vehículos tipo aforados por día
IIR	(m/km)	Índice de rugosidad del terreno ($2 < IIR < 12$)
T_t		Tipo de terreno en el tramo observado (Plano, Lomerío o montañoso)

* NOTA: No se toma en cuenta al operador, ya que el costo de este, se incluye en el modelo de costos operacionales descrito posteriormente.

El tiempo total acumulado por los usuarios en su recorrido por una ruta cualquiera “n”, se puede ver como el cociente de la distancia recorrida por vehículo entre su velocidad promedio, multiplicado a su vez por el número de vehículos tipo “j” y el número de pasajeros por vehículo.

$$T_n = d_n * \left(\frac{u_A N_A}{v_A} + \frac{u_B N_B}{v_B} + \frac{u_{C2} N_{C2}}{v_{C2}} + \frac{u_{C3} N_{C3}}{v_{C3}} + \frac{u_{T3S2} N_{T3S2}}{v_{T3S2}} + \frac{u_{T3S3} N_{T3S3}}{v_{T3S3}} + \frac{u_{T3S2R4} N_{T3S2R4}}{v_{T3S2R4}} + \frac{u_{OTROS} N_{OTROS}}{v_{OTROS}} \right) \quad (2)$$

$$T_{(n,j)} = d_n \sum \frac{u_j N_j}{v_j} \quad ; \quad v_j = f(IIR_n, T_{t_n}) \quad (3)$$

El tiempo total acumulado empleado por los usuarios en su recorrido típico por la ruta principal, está dado por la expresión:

$$T_{RP} = T_{(RP,j)} = T_{(RP,A)} + T_{(RP,B)} + T_{(RP,C2)} + T_{(RP,C3)} + T_{(RP,T3S2)} + T_{(RP,T3S3)} + T_{(RP,T3S2R4)} + T_{(RP,OTROS)} \quad (4)$$

Una vez generada la interrupción de la ruta principal, el tiempo total acumulado empleado por los usuarios en su recorrido por la ruta alterna “i”, está dado por la expresión:

$$T_i = T_{(i,j)} = T_{(i,A)} + T_{(i,B)} + T_{(i,C2)} + T_{(i,C3)} + T_{(i,T3S2)} + T_{(i,T3S3)} + T_{(i,T3S2R4)} + T_{(i,OTROS)} \quad (5)$$

De esta manera, la diferencia de tiempo entre la ruta principal y la ruta alterna se puede ver entonces como sigue:

$$\Delta_{T_i} = T_i - T_{RP} \quad ; \quad \Delta_{t\%} = \left(\frac{T_i}{T_{RP}} \right) * 100\% \quad (6)$$

Donde:

- Δ_{T_i} (s) Diferencia de tiempo entre usar la ruta principal y la ruta alterna “i”
- T_i (s) Tiempo total acumulado utilizando la ruta alterna “i”
- T_{RP} (s) Tiempo total acumulado utilizando la ruta principal
- $\Delta_{t\%}$ (%) Diferencia de tiempo en porcentaje

Finalmente, las consecuencias esperadas por el aumento del tiempo generado al utilizar la ruta alterna “i”, en lugar de la ruta principal, se pueden ver como el producto de la diferencia de tiempos de recorrido y el valor del tiempo de los afectados:

$$C_{TT} = \frac{\Delta_{T_i} * SHP}{24 * 3600} \quad (7)$$

Donde:

- C_{TT} (\$/seg) Pérdidas ocasionadas por el aumento del tiempo de traslado por la ruta alterna “i”
- SHP (\$/hr) Valor del tiempo por motivo de trabajo de la región (Torres, Hernández, & González, 2016)

3.2.2 Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados

Una vez expuesto el modelo anterior, el cual establece que los usuarios llegarán a sus destinos con una diferencia de tiempo considerable, se puede intuir que este aumento en el tiempo de traslado generado por la interrupción de la ruta principal en los usuarios también tendrá un efecto negativo en los mismos al utilizar una ruta alterna más lenta, larga y con un riesgo de accidentes mayor. Visto además como la pérdida de voluntad para trabajar, este efecto persistirá incluso habiendo llegado al lugar de destino.

Bajo el supuesto de que los afectados viajan diariamente durante el periodo de mantenimiento de la ruta principal por motivos laborales o de trabajo, este efecto se puede traducir de manera general en una productividad menor por parte del personal.

$$I_p = (1 - D_p) \quad ; \quad I_p = f(T_i, T_{RP}) \quad (8)$$

Donde:

I_p (%) Índice de productividad

D_p (%) Déficit de productividad

Se propone el parámetro de déficit de productividad como un indicador del porcentaje de tiempo excedente de la ruta alterna tomada, en comparación del tiempo de recorrido esperado en la ruta principal. Si el tiempo de recorrido por la ruta alterna es igual o menor al de la ruta principal, entonces la productividad de los afectados será similar a aquella mostrada anteriormente sin haber afectado su trayecto al trabajo; sin embargo, si el tiempo de recorrido por la ruta alterna propuesta es mayor que aquel generado por la ruta principal, la productividad de los afectados bajará. Para cuantificar este indicador se realiza la siguiente propuesta:

$$\begin{array}{llll} I_p = 100 \% & \text{sí} & \Delta_{t\%} \leq 100\% & ; \quad D_p = 0 \% \\ I_p = 97 \% & \text{sí} & 100\% < \Delta_{t\%} < 130\% & ; \quad D_p = 3 \% \\ I_p = 95 \% & \text{sí} & \Delta_{t\%} \geq 130\% & ; \quad D_p = 5 \% \end{array}$$

Como se observa, el efecto del déficit de la productividad se ve limitado al 5%. Si el tiempo de recorrido por la ruta alterna es igual o menor al tiempo de recorrido de la ruta principal, el uso de la ruta alterna no afectará el rendimiento de los afectados. Por otro lado, si el tiempo de recorrido de la ruta alterna es mayor al tiempo de recorrido de la ruta principal pero no excede de 30%, entonces la productividad bajará 3%. Mientras que, en el peor de los escenarios, si el porcentaje de tiempo excedente de la ruta alterna supera al tiempo de traslado de la ruta principal en más de 30%, la productividad propuesta para los afectados bajará hasta 5%, es decir, el índice de productividad propuesto será de 95%.

Una vez identificado el índice de productividad propuesto y considerando el número de horas laborables a la semana en el Estado (Torres, Hernández, & González, 2016), se puede

obtener el número de horas no laboradas por baja productividad a causa de la utilización de la ruta alterna “i” como sigue:

$$J_{p_i} = (1 - I_{p_i}) * \left(\frac{J_s}{J_e} \right) \quad (9)$$

Donde:

J_{p_i} (hrs/día) Horas no laboradas por baja productividad por día

J_s (hrs/semana) Jornada laboral promedio en el Edo. Méx.

J_e (día/semana) Días laborados por semana

Las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados por tipo de vehículo “j”, al utilizar la ruta alterna “i” se pueden ver como sigue:

$$C_{pro(i,j)} = \left(J_{p_i} * \frac{S_{min}}{J_s/J_e} \right) * N_j u_j = \left(D_{p_i} * S_{min} \right) * N_j u_j \quad (10)$$

Donde:

$C_{pro(i,j)}$ (\$/seg) Pérdidas ocasionadas por baja productividad de los afectados

S_{min} (\$/día) Salario mínimo en el Edo. Méx. (CONASAMI, 2017)

Visto de otra manera, las pérdidas totales ocasionadas por la baja productividad de los usuarios afectados al utilizar la ruta alterna “i”, se pueden observar como sigue:

$$\begin{aligned} C_{pro} &= C_{pro(i,j)} \\ &= C_{pro(i,A)} + C_{pro(i,B)} + C_{pro(i,C2)} + C_{pro(i,C3)} \\ &+ C_{pro(i,T3S2)} + C_{pro(i,T3S3)} + C_{pro(i,T3S2R4)} \\ &+ C_{pro(i,OTROS)} \end{aligned} \quad (11)$$

3.3 CONSECUENCIAS OPERACIONALES

Siguiendo el supuesto de que todos los vehículos van del punto “A” al punto “B”, una vez interrumpida la ruta principal, el 100% del aforo vehicular registrado tendrá que recurrir a una ruta alterna, sin importar las condiciones del camino o las características geométricas del mismo, los operadores tendrán que buscar la ruta más rápida o en el peor de los casos, la ruta única alterna disponible. Sin embargo, en muchas ocasiones este incremento en la distancia,

o bien las malas condiciones del camino alternativo, tendrán efectos negativos en los vehículos, los cuales se traducen en costos operacionales (Arroyo Osorno *et al.*, 2016).

La propuesta para la cuantificación de los costos antes descritos es la utilización de los costos de operación base de los vehículos y su actualización para la República Mexicana, publicada por el IMT (Arroyo Osorno, Torres Vargas, González García, & Hernández García, 2016). Basada en el modelo de Costos Operacionales para Vehículos en México (VOCMEX), esta actualización de costos operacionales toma en cuenta tanto las características técnicas de los vehículos más representativos a nivel nacional así como el costo de sus insumos, tal es el caso de las llantas, lubricantes, mano de obra de mantenimiento, el tiempo del operador, alineamiento geométrico y el estado de la superficie del tramo de interés, entre otros.

3.3.1 Modelo numérico para el cálculo del incremento en los costos operacionales generados

Dada una ruta cualquiera “n”, los costos operacionales generados por tipo de vehículo “j” al utilizar la ruta en cuestión, se pueden ver como el producto del costo operacional de los vehículos y la distancia que estos tendrán que recorrer. Mientras que el costo total acumulado tendrá que multiplicarse también por el número de vehículos tipo “j” observados como sigue:

$$C_{op(n,j)} = d_n * \sum COV_j * N_j ; \quad COV_j = f(IIR_n, T_{t_n}) \quad (12)$$

Donde:

C_{op_j} (\$/seg) Pérdidas operacionales totales por tipo de vehículo “j” al utilizar una ruta cualquiera “n”

COV_j (\$/km/veh) Costo operacional por kilómetro por tipo de vehículo “j”

Para obtener el costo operacional generado por la ruta alterna “i”, se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{op_i} = C_{op_{iA}} + C_{op_{iB}} + C_{op_{iC2}} + C_{op_{iC3}} + C_{op_{iT3S2}} + C_{op_{iT3S3}} + C_{op_{iT3S2R4}} + C_{op_{iOTROS}} \quad (13)$$

Mientras que para obtener el costo operacional generado por la ruta principal se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{op_{RP}} = C_{op_{RPA}} + C_{op_{RPB}} + C_{op_{RPC2}} + C_{op_{RPC3}} + C_{op_{RPT3S2}} + C_{op_{RPT3S3}} + C_{op_{RPT3S2R4}} + C_{op_{RPOTROS}} \quad (14)$$

De esta manera, la diferencia de estos costos, es el costo generado al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de utilizar la ruta principal:

$$C_{op} = C_{op_i} - C_{op_{RP}} \quad (15)$$

Donde:

C_{op} (\$/seg) Pérdidas operacionales totales

$C_{op_{RA}}$ (\$/seg) Pérdidas operacionales al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la principal

$C_{op_{RP}}$ (\$/seg) Pérdidas operacionales al utilizar la ruta principal

3.4 CONSECUENCIAS AL MEDIO AMBIENTE

Como es sabido, los vehículos son una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial. De acuerdo con el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), entre las principales fuentes de contaminación a nivel nacional se encuentran las fuentes móviles que, corresponden a su vez, a los vehículos automotores que circulan por calles y carreteras del país.

Respecto al origen de los contaminantes que generan un cambio climático global, el inventario antes citado destaca las emisiones principalmente de gases de efecto invernadero, entre las que destacan el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), entre otros (SEMARNAT, 2018).

Por otra parte, el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), reporta que en 2013 las emisiones de las fuentes móviles de autotransporte y no carreteras fueron de 174,156.53 Gg de CO_2 , contribuyendo con el 26.2% de las emisiones totales de este compuesto a nivel nacional (INECC, 2013).

De manera particular, para el Estado de México existe también el Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero, publicado por la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM) publicado por el Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (IEECC) en conjunto con PRONATURA A.C. y el INECC. En dicho documento se reportan los resultados del año 2010 sobre las principales causantes del efecto invernadero, entre los cuales destaca nuevamente el CO_2 del sector energía en la categoría de fuentes móviles con una aportación del 20.56% a las emisiones totales de gases de efecto invernadero del Estado (IEECC, 2014).

3.4.1 Modelo numérico para el cálculo de las emisiones de CO₂ generadas

Una vez identificado el CO₂ como uno de los principales contaminantes expedidos a la atmósfera por parte de los vehículos automotores, se propone su cuantificación como uno de los principales efectos adversos de la interrupción de una ruta carretera.

El siguiente modelo tiene como objetivo lograr una estimación cuantitativa aproximada del efecto ocasionado por el aumento de emisiones por parte de los vehículos afectados una vez interrumpida la ruta principal e identificada la ruta alterna “i”. Se da por hecho que el traslado del punto “A” al punto “B” no se verá interrumpido, sin embargo, la variación de la distancia de ambas rutas y las condiciones de estas, determinaran los rendimientos carreteros promedio por tipo de vehículo “j”, además de las emisiones promedio de CO₂, las cuales se miden comúnmente en gramos por kilómetro recorrido.

Para conocer el costo equivalente de estas emisiones generadas por los vehículos afectados durante su recorrido por una ruta cualquiera “n”, se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{ma(n,j)} = C_{CO_2} d_n * (N_A E_A + N_B E_B + N_{C2} E_{C2} + N_{C3} E_{C3} + N_{T3S2} E_{T3S2} + N_{T3S3} E_{T3S3} + N_{T3S2R4} E_{T3S2R4} + N_{OTROS} E_{OTROS}) \quad (16)$$

$$C_{ma(n,j)} = \frac{C_{CO_2} d_n}{10^6} * \sum (N_j E_j) \quad (17)$$

Donde:

$C_{ma(n,j)}$ (\$/seg) Costo equivalente de las emisiones de CO₂ por la ruta “n”

E_j (g/km) Emisiones promedio de CO₂ por tipo de vehículo “j”

C_{CO_2} (\$/ton) Costo de mercado por dejar de producir o limpiar una tonelada de CO₂

Las afectaciones al medio ambiente esperadas por el recorrido diario de los vehículos por la ruta principal están dadas por la ecuación:

$$\begin{aligned} C_{ma_{RP}} &= C_{ma(RP,j)} \\ &= C_{ma(RP,A)} + C_{ma(RP,B)} + C_{ma(RP,C2)} \\ &\quad + C_{ma(RP,C3)} + C_{ma(RP,T3S2)} + C_{ma(RP,T3S3)} \\ &\quad + C_{ma(RP,T3S2R4)} + C_{ma(RP,OTROS)} \end{aligned} \quad (18)$$

Una vez generada la interrupción de la ruta principal, el costo equivalente de las emisiones de CO₂ al ambiente generadas por los vehículos en su recorrido por la ruta alterna “i”, está dado por la expresión:

$$\begin{aligned}
 C_{ma_i} &= C_{ma(i,j)} \\
 &= C_{ma(i,A)} + C_{ma(i,B)} + C_{ma(i,C2)} + C_{ma(i,C3)} \\
 &\quad + C_{ma(i,T3S2)} + C_{ma(i,T3S3)} + C_{ma(i,T3S2R4)} \\
 &\quad + C_{ma(i,OTROS)}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Finalmente se obtiene una cuantificación para el aumento de CO₂ al ambiente, como la diferencia entre las emisiones generadas por la ruta alterna “i” y aquellas esperadas en la ruta principal.

$$C_{ma} = C_{ma_i} - C_{ma_{RP}} \tag{20}$$

Donde:

C_{ma} (\$/seg) Costo equivalente de las emisiones de CO₂ al utilizar la ruta alterna “i”

C_{ma_i} (\$/seg) Costo de las emisiones de CO₂ expedidas en la ruta alterna “i”

$C_{ma_{RP}}$ (\$/seg) Costo de las emisiones de CO₂ expedidas en la ruta principal

3.5 CONSECUENCIAS DE POSIBLES ACCIDENTES CON VÍCTIMAS

Para determinar los principales indicadores referentes a accidentes automovilísticos, sus efectos y consecuencias, el IMT realiza un anuario estadístico de accidentes en carreteras federales (Cuevas *et al.*, 2016). En dicho documento se muestran las estadísticas más relevantes generadas a partir de una base de datos elaborada por la Policía Federal, asimismo, esta base de datos incluye información sobre los accidentes en la Red Carretera Federal, que consta de más de 49 mil km de longitud.

Como resultado medular del anuario se muestran al lector algunas estadísticas básicas entre las que destacan aquellas referentes a los daños materiales ocasionados por accidentes automovilísticos en tramos carreteros identificados de la red federal.

Por otra parte, la información mostrada en este anuario se ve complementada con los indicadores de seguridad vial en la Red Carretera Federal (Cuevas Colunga *et al.*, 2011), ya que entre estos indicadores se encuentran los referentes a la accidentalidad, mortalidad y morbilidad de las carreteras nacionales de cuota de cuatro y dos carriles, además de aquellas libres de peaje tipo “ET”, “A”, “B”, “C” y “D” de cuatro y dos carriles respectivamente.

Utilizando la información referente a los saldos por tramo en el Estado de México de acuerdo al anuario estadístico de accidentes en carreteras federales (Cuevas Colunga *et al.*, 2016) y las ecuaciones propuestas por el IMT contenidas en los indicadores de seguridad vial en la Red Carretera Federal (Cuevas Colunga *et al.*, 2011), se propone la siguiente metodología para el cálculo de los costos generados por las pérdidas materiales, heridos y pérdidas de vidas humanas ocasionados por la utilización de una ruta alterna al quedar interrumpida la ruta principal. Es importante mencionar que los tres modelos siguientes toman en cuenta el efecto de los “k” tramos que conforman a la ruta principal y a las rutas alternas disponibles.

3.5.1 Modelo numérico para el cálculo de los costos materiales en accidentes

La variación de las características de cada ruta así como las condiciones de esta determinarán el número promedio de accidentes. Si se conoce el costo esperado por accidente y el número de accidentes promedio en los tramos en estudio involucrados entonces los costos materiales de los accidentes derivados de la utilización de una ruta cualquiera “n” se pueden ver como sigue:

$$C_{PM_n} = \frac{d_n * Ax_n * C_{Ax_n}}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (21)$$

Donde:

C_{PM_n} (\$/seg)	Pérdidas materiales esperadas al utilizar la ruta en estudio
Ax_n (accidente/km/año)	Número de accidentes por km al año en la ruta en estudio
C_{Ax_n} (\$/accidente)	Costo por accidente de la ruta en estudio

Sin embargo, la mayoría de las veces la ruta principal y las rutas alternas disponibles se componen a su vez por tramos individuales, los cuales cuentan con características distintas como lo son la configuración geométrica, el TDPA propio (independiente al aforo vehicular que se va a verter a la ruta alterna proveniente de la interrupción de la ruta principal) e incluso algunas pueden involucrar peaje, lo que ocasiona que el índice de accidentes varíe. A diferencia de los modelos anteriores que dependen únicamente de la distancia total de la ruta alterna “n” en estudio, es decir, la variable “ d_n ”, para el caso del modelo en cuestión es necesario conocer los “k” tramos que la componen; esto para lograr una mejor estimación de

las pérdidas monetarias ocasionadas por los accidentes derivados de la utilización de la ruta alterna “i”. De esta manera, la distancia total de la ruta en estudio se puede ver como:

$$d_n = d_{(n,k)} = t_{(n,1)} + \dots + t_{(n,k)} = \sum t_{(n,k)} \quad (22)$$

Donde:

$d_{(n,k)}$ (km/veh) Distancia total recorrida por la ruta “n” conformada por “k” tramos
 $t_{(n,k)}$ (km/veh) Distancia recorrida por vehículo en el tramo “k” de la ruta “n”

Para conocer las pérdidas materiales de los accidentes derivados de los vehículos afectados durante su recorrido por los “k” tramos de una ruta cualquiera “n”, se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{PM(n,k)} = \sum t_{(n,k)} * Ax_{(n,k)} * C_{Ax(n,k)} \quad (23)$$

Donde:

$C_{PM(n,k)}$ (\$/seg) Pérdidas por accidentes en los “k” tramos de la ruta “n”
 $Ax_{(n,k)}$ (accidente/km/año) Accidentes por km al año en el tramo “k” de la ruta “n”
 $C_{Ax(n,k)}$ (\$/ton) Costo por accidente en el tramo “k” de la ruta “n”

De esta manera, las pérdidas materiales esperadas en la ruta principal serán:

$$C_{PM(RP,k)} = \sum t_{(RP,k)} * Ax_{(RP,k)} * C_{Ax(RP,k)} \quad (24)$$

Además, las pérdidas materiales esperadas en la ruta alterna “i” serán:

$$C_{PM(i,k)} = \sum t_{(i,k)} * Ax_{(i,k)} * C_{Ax(i,k)} \quad (25)$$

Finalmente, las pérdidas materiales esperadas por utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la ruta principal, al quedar esta última interrumpida, se pueden ver como:

$$C_{PM} = C_{PM(i,k)} - C_{PM(RP,k)} \quad (26)$$

Donde:

C_{PM} (\$/seg) Pérdidas materiales totales por accidentes al utilizar la ruta “i”
 $C_{PM(i,k)}$ (\$/seg) Pérdidas materiales por accidentes al utilizar la ruta “i”
 $C_{PM(RP,k)}$ (\$/seg) Pérdidas materiales por accidentes al utilizar la ruta principal

Es importante mencionar que para la obtención del número de accidentes por kilómetro, parámetro denotado por la variable “ $A_{X(n,k)}$ ”, se propone la utilización del modelo de accidentes por kilómetro del IMT (IMT, 2017). De esta manera, el número de accidentes por kilómetro depende únicamente de la clasificación y del TDPA del tramo “k” en cuestión.

$$A_{x(n,k)} = X_1 N_{(n,k)}^2 + Y_1 N_{(n,k)} + Z_1 \quad ; \quad X_1, Y_1, Z_1 = f(C_{l_k}) \quad (27)$$

Donde:

C_{l_k}	Clasificación del tramo “k” según la SCT
$N_{(n,k)}$ (veh)	Aforo registrado en el tramo “k” de la ruta “n” (TDPA)
X_1, Y_1, Z_1	Constantes obtenidas del modelo de muertos por kilómetro (IMT, 2016)

3.5.2 Modelo numérico para el cálculo de los costos por decesos en accidentes

La variación de las características de cada ruta, así como las condiciones de esta, determinarán el número promedio de accidentes y estos, a su vez, podrán ocasionar fatalidades. Si se conoce el costo esperado por cada deceso por accidente, además del número de decesos por kilómetro en los tramos en estudio involucrados, entonces las pérdidas ocasionadas por las muertes en los accidentes derivados de la utilización de una ruta cualquiera “n” se pueden ver como sigue:

$$C_{MU_n} = \frac{d_n * M_n * C_{M_n}}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (28)$$

Donde:

C_{M_n} (\$/seg)	Pérdidas por decesos al utilizar la ruta en estudio
M_n (muertos/km/año)	Número de muertos por km al año en la ruta en estudio
C_{MU_n} (\$/muerto)	Costo por deceso en la ruta en estudio

Al igual que en el caso del modelo de pérdidas materiales, en el modelo en cuestión es necesario conocer los “k” tramos que componen la ruta “n” en estudio. De esta manera, las pérdidas esperadas por decesos en los accidentes derivados de los vehículos afectados durante su recorrido por los “k” tramos de una ruta cualquiera “n”, se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{MU(n,k)} = \sum t_{(n,k)} * M_{(n,k)} * C_{M(n,k)} \quad (29)$$

Donde:

$C_{MU(n,k)}$ (\$/seg) Pérdidas por decesos en los “k” tramos de la ruta “n”
 $M_{(n,k)}$ (muertos/km/año) Muertos por km al año en el tramo “k” de la ruta “n”
 $C_{M(n,k)}$ (\$/muerto) Costo por decesos en el tramo “k” de la ruta “n”

De esta manera, las pérdidas equivalentes por decesos en la ruta principal serán:

$$C_{MU(RP,k)} = \sum t_{(RP,k)} * M_{(RP,k)} * C_{M(RP,k)} \quad (30)$$

Además, las pérdidas equivalentes por decesos en la ruta alterna “i” serán:

$$C_{MU(i,k)} = \sum t_{(i,k)} * M_{(i,k)} * C_{M(i,k)} \quad (31)$$

Finalmente, las pérdidas esperadas por los decesos ocasionados en accidentes al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la ruta principal, al quedar esta última interrumpida, se pueden ver como:

$$C_{MU} = C_{MU(i,k)} - C_{MU(RP,k)} \quad (32)$$

Donde:

C_{MU} (\$/seg) Pérdidas totales por decesos en accidentes al utilizar la ruta “i”
 $C_{MU(i,k)}$ (\$/seg) Pérdidas por decesos en accidentes al utilizar la ruta “i”
 $C_{MU(RP,k)}$ (\$/seg) Pérdidas totales por decesos en accidentes al utilizar la ruta principal

Es importante mencionar que para la obtención del número de muertes por kilómetro, parámetro denotado por la variable “ $M_{(n,k)}$ ”, se propone la utilización del modelo de muertes por kilómetro del IMT (IMT, 2017). De esta manera, el número de muertes por kilómetro depende únicamente de la clasificación y del TDPA del tramo “k” en cuestión.

$$M_{(n,k)} = X_2 N_{(n,k)}^2 + Y_2 N_{(n,k)} + Z_2 \quad ; \quad X_2, Y_2, Z_2 = f(C_{l_k}) \quad (33)$$

Donde:

X_2, Y_2, Z_2 Constantes obtenidas del modelo de muertes por kilómetro (IMT, 2016)

3.5.3 Modelo numérico para el cálculo de los costos por heridos en accidentes

La variación de las características de cada ruta, así como las condiciones de esta, determinarán el número promedio de accidentes y estos a su vez podrán ocasionar lesiones y heridos. Si se conoce el costo esperado por cada herido por accidente, además del número de heridos por kilómetro en los tramos en estudio involucrados, entonces las pérdidas ocasionadas por lesiones y heridos en los accidentes derivados de la utilización de una ruta cualquiera “n” se pueden ver como sigue:

$$C_{HE_n} = \frac{d_n * H_n * C_{H_n}}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (34)$$

Donde:

C_{HE_n} (\$/seg)	Pérdidas por heridos al utilizar la ruta en estudio
H_n (herido/km/año)	Número de heridos por km al año en la ruta en estudio
C_{H_n} (\$/herido)	Costo por herido en la ruta en estudio

Al igual que en el caso del modelo de pérdidas materiales, en el modelo en cuestión es necesario conocer los “k” tramos que componen la ruta “n” en estudio. De esta manera, las pérdidas esperadas por heridos en los accidentes derivados de los vehículos afectados durante su recorrido por los “k” tramos de una ruta cualquiera “n”, se plantea la siguiente ecuación:

$$C_{HE(n,k)} = \sum t_{(n,k)} * H_{(n,k)} * C_{H(n,k)} \quad (35)$$

Donde:

$C_{HE(n,k)}$ (\$/seg)	Pérdidas por heridos en los “k” tramos de la ruta “n”
$H_{(n,k)}$ (heridos/km/año)	Heridos por km al año en el tramo “k” de la ruta “n”
$C_{H(n,k)}$ (\$/herido)	Costo por herido en el tramo “k” de la ruta “n”

De esta manera, las pérdidas equivalentes por decesos en la ruta principal serán:

$$C_{HE(RP,k)} = \sum t_{(RP,k)} * H_{(RP,k)} * C_{H(RP,k)} \quad (36)$$

Además, las pérdidas equivalentes por decesos en la ruta alterna “i” serán:

$$C_{HE(i,k)} = \sum t_{(i,k)} * H_{(i,k)} * C_{H(i,k)} \quad (37)$$

Finalmente, las pérdidas esperadas por los decesos ocasionados en accidentes al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la ruta principal, al quedar esta última interrumpida, se pueden ver como:

$$C_{HE} = C_{HE(i,k)} - C_{HE(RP,k)} \quad (38)$$

Donde:

C_{HE}	(\$/seg)	Pérdidas totales por heridos en accidentes al utilizar la ruta “i”
$C_{HE(i,k)}$	(\$/seg)	Pérdidas por heridos en accidentes al utilizar la ruta “i”
$C_{HE(RP,k)}$	(\$/seg)	Pérdidas totales por heridos en accidentes al utilizar la ruta principal

Es importante mencionar que para la obtención del número de heridos por kilómetro, parámetro denotado por la variable “ $H_{(n,k)}$ ”, se propone la utilización del modelo de heridos por kilómetro del IMT (IMT, 2017). De esta manera, el número de heridos por kilómetro depende únicamente de la clasificación y del TDPA del tramo “k” en cuestión.

$$H_{(n,k)} = X_3 N_{(n,k)}^2 + Y_3 N_{(n,k)} + Z_3 \quad ; \quad X_3, Y_3, Z_3 = f(C_{l_k}) \quad (39)$$

Donde:

X_3, Y_3, Z_3 Constantes obtenidas del modelo de muertos por kilómetro (IMT, 2016)

3.6 CONSECUENCIAS DE POSIBLES RUTAS CON PEAJE

Dentro del territorio nacional, además de las carreteras libres de peaje, la red carretera se compone también por autopistas de cuota. De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), entre las autopistas de cuota destacan aquellas construidas por el Estado y entregadas a CAPUFE para su administración, además de aquellas concesionadas a particulares, gobiernos estatales o instituciones financieras (INEGI, 2012). En su mayoría los recorridos diarios que involucran distancias largas implican tramos con peaje, no obstante, existen alternativas a estas que cumplen con el mismo objetivo, sin embargo, las condiciones de estas ofrecerán un nivel de servicio menor.

3.6.1 Modelo numérico para el cálculo de tarifas de peaje

Una vez interrumpida la ruta principal, el traslado del punto “A” al punto “B” no se verá suspendido, la búsqueda de rutas alternas llevará a la utilización de tramos con peaje. En ocasiones las condiciones de los tramos que involucran peaje cuentan incluso con mejores características que aquellos tramos de la ruta principal resultando incluso en un tiempo de recorrido menor, sin embargo, las tarifas elevadas por tipo de vehículo no resultan costeables para la mayoría de los automovilistas y transportistas afectados.

Para conocer las pérdidas ocasionadas por la utilización de una ruta cualquiera “n” que involucra peaje se plantea la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 C_{P_n} = & P_{(n,A)}N_{(n,A)} + P_{(n,B)}N_{(n,B)} + P_{(n,C2)}N_{(n,C2)} \\
 & + P_{(n,C3)}N_{(n,C3)} + P_{(n,T3S2)}N_{(n,T3S2)} \\
 & + P_{(n,T3S3)}N_{(n,T3S3)} + P_{(n,T3S2R4)}N_{(n,T3S2R4)} \\
 & + P_{(n,OTROS)}N_{(n,OTROS)}
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$C_{P_{(n,j)}} = \sum P_{(n,j)}N_{(n,j)} \tag{41}$$

Donde:

$C_{P_{(n,j)}}$ (\$/seg) Pérdidas totales por peaje al utilizar la ruta “n”

$P_{(n,j)}$ (\$/veh) Tarifa total por vehículo “j” en la ruta “n”

Al igual que en el caso de los modelos de pérdidas materiales, heridos y muertes en el modelo en cuestión es necesario conocer los “k” tramos que componen la ruta “n” en estudio ya que no todos los tramos involucrados en la ruta en cuestión involucran peaje.

De esta manera, las pérdidas esperadas por peaje de los vehículos afectados durante su recorrido por los “k” tramos de una ruta cualquiera “n”, se pueden ver como sigue:

$$C_{P_{(n,j,k)}} = \sum P_{(n,j,k)}N_{(n,j,k)} \tag{42}$$

Donde:

$C_{P_{(n,j,k)}}$ (\$/seg) Pérdidas totales por peaje al utilizar los “k” tramos de la ruta “n”

$P_{(n,j,k)}$ (\$/veh) Tarifa total por vehículo “j” en los “k” tramos de la ruta “n”

De esta manera, las pérdidas equivalentes por peaje en la ruta principal serán:

$$C_{P_{RP}} = C_{P_{(RP,j,k)}} = \sum P_{(RP,j,k)}N_{(RP,j,k)} \tag{43}$$

Además, las pérdidas equivalentes por peaje en la ruta alterna “i” serán:

$$C_{P_i} = C_{P_{(i,j,k)}} = \sum P_{(i,j,k)}N_{(i,j,k)} \tag{44}$$

Finalmente, las pérdidas esperadas por el peaje generado al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la ruta principal, al quedar esta última interrumpida, se pueden ver como:

$$C_P = C_{P_i} - C_{P_{RP}} \quad (45)$$

Donde:

- C_P (\$/seg) Pérdidas totales por peaje al utilizar la ruta “i”
 $C_{P_{(i,j,k)}}$ (\$/seg) Pérdidas por peaje al utilizar la ruta “i” en lugar de la ruta principal
 $C_{P_{(RP,j,k)}}$ (\$/seg) Pérdidas totales por peaje al utilizar la ruta principal

3.7 MODELO GENERAL DE CONSECUENCIAS (MGC)

Una vez planteados los modelos descritos anteriormente, las consecuencias esperadas dada la interrupción de la ruta principal al utilizar una ruta alterna “i”, se pueden ver como la suma de las consecuencias socioeconómicas, operacionales y aquellas ocasionadas al medio ambiente así como las derivadas de pérdidas materiales, heridos y muertes en accidentes, como se muestra en la ecuación 46.

$$C = C_{TT_i} + C_{PRO_i} + C_{OP_i} + C_{MA_i} + C_{Ax_i} + C_{MU_i} + C_{HE_i} + C_{P_i} \quad (46)$$

Donde:

- C (\$/seg) Pérdidas totales al utilizar la ruta “i”

Es así como el modelo propuesto logra considerar la totalidad de las consecuencias planteadas, así como la cuantificación de las posibles pérdidas derivadas de la utilización de una ruta alterna al quedar impedida la ruta principal. Es importante mencionar que el modelo considera únicamente las principales consecuencias expuestas en el Capítulo 2, ya que de acuerdo a la revisión de la literatura estas se encuentran entre las más significativas.

A continuación, en el Capítulo 4, se aplica la metodología propuesta a un caso de estudio en particular, siendo este la interrupción parcial de un tramo de la carretera panamericana, conocido como Toluca -Palmillas, ubicado en el Estado de México y perteneciente al corredor México-Nogales, el cual recorre gran parte de México, iniciando en la Ciudad de México y terminando en Nogales, Sonora, frontera con los Estados Unidos.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 CASO DE ESTUDIO PROPUESTO

La Ruta o Carretera Panamericana es un sistema de carreteras que abarca más de 48,000 km de longitud y toma su nombre al conectar a la mayoría de los países del continente americano a través de un conjunto de carreteras de diferentes especificaciones. La idea de contar con esta importante carretera que conecta desde Alaska al Norte de Estados Unidos hasta Buenos Aires en Argentina, fue presentada en la Quinta Conferencia Panamericana celebrada en Chile en 1923 (Columbia University Press, 2012). Asimismo, su construcción fue promovida y financiada por los Estados Unidos entre los años de 1940 y 1950. Sin embargo, el recorrido se ve interrumpido en la frontera entre Colombia y Panamá donde hacen falta 130 km de carpeta de rodamiento que a la fecha no se han construido derivado de la falta de un acuerdo entre las dos naciones antes mencionadas (Salazar, 2009).

A nivel nacional, en 1950 el presidente Miguel Alemán Valdez fue el responsable de inaugurar formalmente la carretera Panamericana, mejor conocida como la Carretera Federal 45, la cual marcó un parteaguas en la historia de México por su longitud de más de 3,400 km, siendo la vía de comunicación más extensa del país a la fecha (SCT, 2012). Con una longitud actual superior a los 1,920 km, esta carretera es una de las más importantes del país pues hace un recorrido que geográficamente va desde la frontera norte con los Estados Unidos en Ciudad Juárez, Chihuahua hasta el centro del país, donde atraviesa el Estado de México y la Ciudad de México para finalmente llegar hasta la frontera sur del país atravesando los estados de Oaxaca y Chiapas.

De manera local, en el Estado de México la Carretera Panamericana originalmente atravesaba de extremo norte a sur su territorio. Ahora bien, para poder constituirse el proyecto diversos municipios del Estado como Atlacomulco, Ixtlahuaca, Morelos, Jocotitlán, Almoloya de Juárez y Toluca, cedieron terrenos para la construcción del proyecto que tuvo como bien conectar el centro del país con el norte de México respectivamente (SEGOB, 2018). El resultado de esta cooperación intermunicipal derivó en la carretera Toluca-Atlacomulco, la cual conecta en el extremo sur a la capital del Estado con la Ciudad de México a través de su paso por Lerma y la Marquesa, mientras que al norte permite una comunicación efectiva con el estado de Querétaro atravesando los municipios de Acambay, Polotitlán y Aculco hasta llegar localidad de Palmillas, municipio de San Juan del Río, Querétaro.

Para efectos de la presente investigación, el tramo de interés será el conformado por el recorrido desde el km 0+000 a las afueras de la ciudad de Toluca hasta el 131+520 ubicado en la localidad de Palmillas, municipio de San Juan del Río y que para fines prácticos se le denominará de ahora en adelante como Tramo Toluca-Palmillas, ya que esta es la denominación que le ha otorgado la SCT (SCT, 2014). Dicho tramo sirve como interconexión entre los corredores México-Nuevo Laredo y México-Nogales que, como ya se mencionó en el capítulo 1, son dos de los principales corredores carreteros del país.

4.1.1 Justificación del caso de estudio propuesto.

Para denotar la importancia del tramo carretero Toluca-Palmillas, el cual es ocupado principalmente por vehículos de carga, es importante mencionar que, de acuerdo a la clasificación vigente de la SCT, este tramo forma parte del corredor México-Nogales, el cual recorre gran parte de México, iniciando en la Ciudad de México y terminando en Nogales, Sonora, frontera con los Estados Unidos.

De manera particular, dentro del programa federal de egresos para el año 2014, el Gobierno Federal a través de la SCT determinó invertir en la rehabilitación del corredor México-Nogales determinando puntos críticos para dar mantenimiento entre los que destaca el tramo Toluca-Palmillas, destacándolo como primordial para el transporte de bienes y servicios. Esta rehabilitación consistió en la modernización de dos a cuatro carriles junto con una ampliación del eje troncal de siete a veintidós metros y cuya inversión ascendió a los 2,521 mdp a lo largo de más de 63 kilómetros de carretera (SCT, 2014).

Es importante mencionar que con esta acción se logró un mejoramiento de la infraestructura carretera brindando beneficios como la disminución del tiempo de traslado, mejorando la conectividad, facilitando el tránsito vehicular y se favoreciendo a su vez, el transporte de pasaje, carga y turismo del centro del país hacia el norte y occidente de la República Mexicana. Asimismo, esta obra refleja un mejoramiento en menores tiempos de traslado hacia la población y propicia al crecimiento exponencial de los beneficios sociales de las comunidades pueblos y ciudades vecinas, además de esto el proyecto en cuestión asegura el incremento de la competitividad de la región al incrementar la seguridad y contribuir al crecimiento del país (SCT, 2014).

Una vez denotada la importancia de este tramo carretero es necesario también mencionar que la interrupción en su servicio generaría pérdidas evidentes cuya determinación es objeto del presente trabajo y cuyo procedimiento para lograr una cuantificación representativa se describe en los numerales siguientes.

4.2 CONFIGURACIÓN DE LA RED CARRETERA

Ahora bien, como ya se ha descrito en el capítulo anterior, es posible conocer las consecuencias esperadas de la interrupción del servicio de la red a partir de la comparación entre los costos esperados por utilizar la ruta principal y aquellos generados por la utilización de rutas alternas. La red propuesta está justamente conformada por una ruta principal, es decir, el tramo Toluca-Palmillas, para lo cual es necesario mencionar que, bajo el escenario de una interrupción parcial en alguna de sus partes o subtramos, los usuarios deberán de buscar otra ruta disponible para lograr llegar a su destino, sin embargo, no habrá sólo una disponible por lo que es de vital importancia conocer cuál de las alternativas disponibles es la mejor.

4.2.1 Identificación de la ruta principal

Como ya se ha mencionado el tramo Toluca-Palmillas, está conformado por el recorrido desde el km 0+000 a las afueras de la ciudad de Toluca hasta el 122+600 ubicado en la localidad de Palmillas, municipio de San Juan del Río. De manera particular y para lograr un mejor entendimiento del trayecto, este recorrido se puede dividir a su vez en subtramos principales, los cuales se describen a continuación con un cadenamiento propuesto:

- A) Subtramo Toluca-Atacomulco (55D):** conformado por una longitud de 45.4 km sobre la carretera federal No. 55. Parte de la plaza de cobro “El Dorado” en el cadenamiento 0+000 hasta la plaza de cobro “Atacomulco” en el cadenamiento 45+400 y atraviesa a los municipios de Ixtlahuaca y Jocotitlán.
- B) Subtramo Atacomulco-Acambay (57):** conformado por una longitud de 23.3 km sobre la carretera federal No. 57. Parte de la plaza de cobro “Atacomulco” en el cadenamiento 45+400 hasta la entrada al libramiento de Acambay en el cadenamiento 68+700. Como puntos de interés de este tramo se tienen las intersecciones con las carreteras Atacomulco-Morelia además de la autopista Arco Norte.
- C) Subtramo Acambay-Palmillas (57):** conformado por una longitud de 53.9 km sobre la carretera federal No. 57. Parte del libramiento de Acambay en el cadenamiento

68+700 hasta intersección con la autopista México-Querétaro en el cadenamiento 122+600, atravesando respectivamente los municipios de Aculco y Polotitlán hasta llegar con los límites del estado de Querétaro.

A continuación, se describe de manera gráfica el recorrido necesario para cubrir el tramo Toluca-Palmillas (Ver Figura 4.1), considerado el cadenamiento 0+000 como el punto “A” mientras que el punto “B” se encuentra ubicado en el 122+600.



Figura 4.1 Tramo Toluca-Palmillas y subtramos que lo conforman (Fuente: elaboración propia)

4.2.2 Identificación de escenarios de interrupción del servicio

A lo largo de los últimos años se han presentado diversos fenómenos tanto naturales como sociales que han afectado el correcto funcionamiento del tramo Toluca-Palmillas, los cuales

van desde deslizamientos de taludes y accidentes automovilísticos hasta manifestaciones para externar inconformidades de carácter político y social.

Interrupción del subtramo Toluca-Atlaconulco: entre las principales causas de la interrupción de este subtramo se encuentran los accidentes automovilísticos donde la mayoría de las veces intervienen vehículos de carga (Ver Figuras 4.2 y 4.3). Asimismo, los trabajos de mantenimiento mal planeados generan comúnmente un tránsito lento, sin embargo, este no impide el paso por la vía sino simplemente merma el flujo vehicular. Además, es importante mencionar que en la zona cercana al paso de Río Lerma es común encontrar accidentes derivados de los altos niveles de neblina.



Figura 4.2 Accidente vehicular ocasiona cierre total de la Toluca-Atlaconulco (El Sol de Toluca, 2019)



Figura 4.3 Carambola de varios vehículos ocasiona cierre total de la Toluca-Atlaconulco (MVS Noticias, 2016)

En cuanto a manifestaciones sociales es importante mencionar que este tramo ha sido tomado en repetidas ocasiones por habitantes de los municipios vecinos que han exigido el paso libre sin peaje de dicho tramo ocasionando un cierre total de la carretera. Por otra parte, la plaza de cobro “Atlaconulco” ha sido objeto de manifestaciones estudiantiles desde enero

de 2019 por parte de los estudiantes de la normal de Tenería de Tenancingo lo que ha ocasionado de igual manera cierres parciales del tramo durante el periodo de toma de casetas (Ver Figuras 4.4 y 4.5).



Figura 4.4 y 4.5 Vecinos de la Toluca-Atlacomulco ocasionan cierre total de la pista (Red Acción, 2016) y cierre parcial por normalistas de Tenería (MVS Noticias, 2019)

Interrupción del subtramo Atlacomulco-Acambay: el cierre de este subtramo es el que tiene mayor incidencia derivado de las pronunciadas pendientes con las que cuenta y derivado de que en su mayoría es un trayecto montañoso o de lomerío. Además de esto es común que en épocas de lluvia se generen deslizamientos los cuales han llegado a ocasionar un cierre total de este subtramo (Ver Figuras 4.6 y 4.7). Si bien, se han realizado trabajos de mantenimiento y rehabilitación en los cuales principalmente se ha redibujado los radios de curva, esto no ha impedido que sigan ocurriendo percances. Este tramo al igual que el anterior, es un tramo propenso a la neblina por lo que dificulta la visibilidad a sus usuarios.



Figura 4.6 y 4.7 Accidente con 20 lesionados sobre la carretera Atlacomulco-Acambay (El Sol de Toluca, 2019) y cierre total de un sentido ocasionado por deslave (El Sol de Toluca, 2018)

Interrupción del subtramo Acambay-Palmillas: es un tramo que ha sido rehabilitado constantemente ya que su trazo original era sobre la falla de San Andrés. Sin embargo, para efectos del presente trabajo el trayecto que se toma en cuenta es por medio del boulevard Acambay el cual se reincorpora a la carretera 57, el cual es actualmente obligatorio para todos

los vehículos pesados y de carga, dadas las complicaciones generadas por la falla geológica de la zona (Ver Figuras 4.8 y 4.9).



Figura 4.8 y 4.9 Hundimientos en la carretera Acambay-Palmillas impiden el paso de vehículos y la continuación de obra de SCT (Milenio, 2017)

Por otra parte, es un tramo principalmente ubicado en terrenos catalogados como lomerío, propenso a deslizamientos de taludes al igual que otros fenómenos naturales como granizo y lluvia excedente que han ocasionado cierre total del servicio. Además de que en 2017 este tramo fue cerrado por algunas horas por vecinos de una comunidad del municipio de Acambay debido a una persona atropellada que posteriormente derivó en la construcción de un puente peatonal además de reductores de velocidad (El Sol de Toluca, 2017)

4.2.3 Identificación de rutas alternas

Dado a que cada uno de los subtramos que conforman el trayecto Toluca-Palmillas han sido cerrados anteriormente, es indispensable conocer las alternativas para recorrer el tramo desde Toluca hasta Palmillas si alguno de los subtramos que componen este trayecto quedara inhabilitado por algún factor natural o social. Para esto se enlistan los tramos de apoyo que conformarán posteriormente las rutas alternas propuestas:

A) Subtramo Atlacomulco-Acambay (40D): Conformado por una longitud de 23.3 km sobre autopista Arco Norte. Parte de las afueras del municipio de Atlacomulco hasta la intersección con la 57 con el boulevard Acambay. Es una alternativa al subtramo Atlacomulco-Acambay (57), sin embargo, cuenta con peaje.

B) Subtramo Toluca-Jilotepec (11): Conformado por una longitud de 83.1 km sobre la Carretera Federal N° 11, es una alternativa viable para suplir al tramo Toluca-Atlacomulco(57D) si es que este se encuentra cerrado.

C) Subtramo Jilotepec-Acambay (40D): Conformado por una longitud de 39.1 km sobre la autopista Arco Norte. Parte del municipio de Jilotepec hasta la intersección con la 57 con el boulevard Acambay. Es una alternativa viable para reincorporarse a la ruta principal aun cuando el tramo Toluca-Atlacomulco se encuentre cerrado, no obstante, involucra peaje.

D) Subtramo Jilotepec-Palmillas (57D): Conformado por una longitud de 67.2 km sobre la carretera México-Querétaro. Parte del municipio de Jilotepec y comunica directamente a Palmillas supliendo de esta manera el trayecto de Atlacomulco hasta Palmillas aunque involucra peaje.

Es importante mencionar que además de los tramos enlistados en el apartado anterior, existen evidentemente otras alternativas, sin embargo, cuentan con especificaciones muy bajas o distancias muy largas por lo que su análisis no se contempla en el presente trabajo. Dicho lo anterior y con el objetivo de lograr una identificación eficiente de las rutas alternas posibles, se considerarán únicamente los cuatro tramos antes mencionados para la conformación de rutas alternas.

Posterior al análisis de la información referente a los subtramos de apoyo disponibles, se proponen las siguientes rutas alternas posibles:

Ruta alterna 1: Toluca-Atlacomulco (55D), Atlacomulco-Acambay (57), Acambay-Jilotepec (40D), Jilotepec-Palmillas (57D).

Ruta alterna 2: Toluca-Atlacomulco (55D), Atlacomulco-Acambay (40D), Acambay-Palmillas (57).

Ruta alterna 3: Toluca -Atlacomulco (55D), Atlacomulco-Acambay (40D), Acambay-Jilotepec (40D), Jilotepec-Palmillas (57D).

Ruta alterna 4: Toluca -Jilotepec (11), Jilotepec-Acambay (40D), Acambay-Palmillas (57).

Ruta alterna 5: Toluca-Jilotepec (11), Jilotepec-Palmillas (57D).

Asimismo, se identifican los siguientes escenarios de interrupción (Figuras 4.10 a 4.15):

Escenario I: Interrupción del servicio del subtramo Acambay-Palmillas (57); las rutas alternas disponibles en función del tramo interrumpido serán la ruta 4 y 5 respectivamente.

Escenario II: Interrupción del servicio del subtramo Atlacomulco-Acambay (57); las rutas alternas disponibles en función del tramo interrumpido serán la ruta 2, 3, 4 y 5 respectivamente.

Escenario III: Interrupción del servicio del subtramo Toluca-Atlaconulco (55D); las rutas alternas disponibles en función del tramo interrumpido serán la ruta 1, 3 y 5 respectivamente.

A continuación, se describen gráficamente las 5 rutas alternas propuestas para el caso de estudio propuesto.

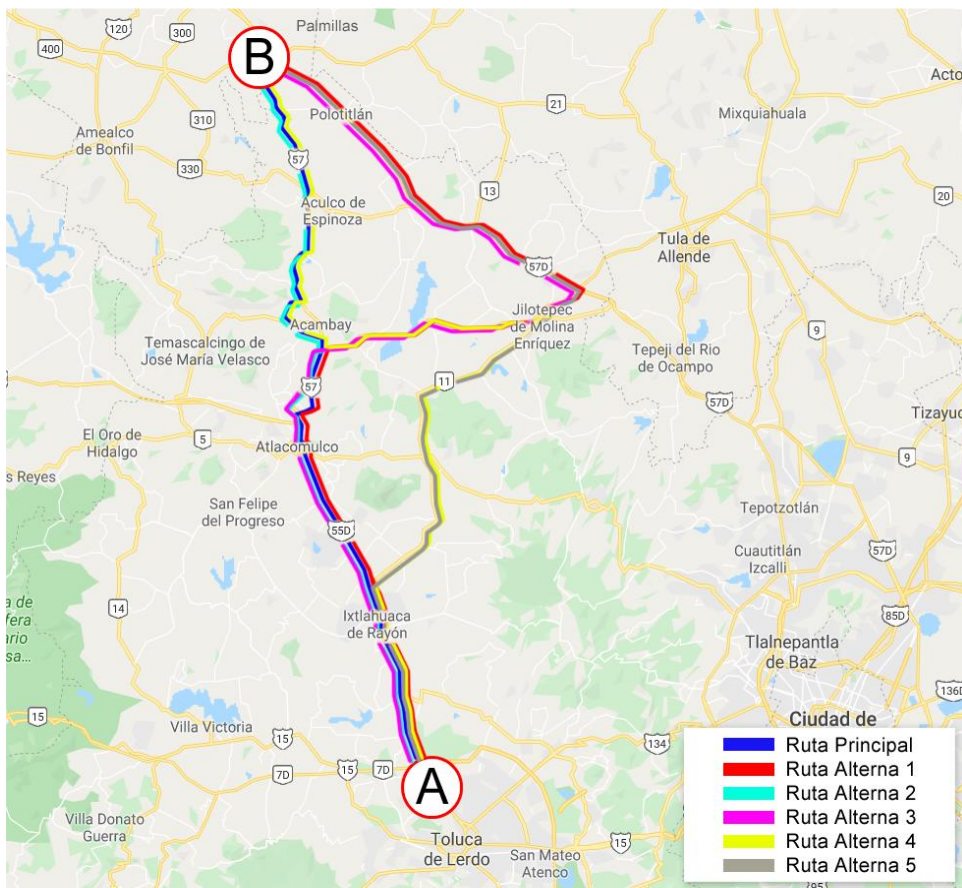


Figura 4.10 Se muestran las 5 rutas alternas disponibles al interrumpirse alguno de los tramos que conforma a la ruta principal (Fuente: elaboración propia)

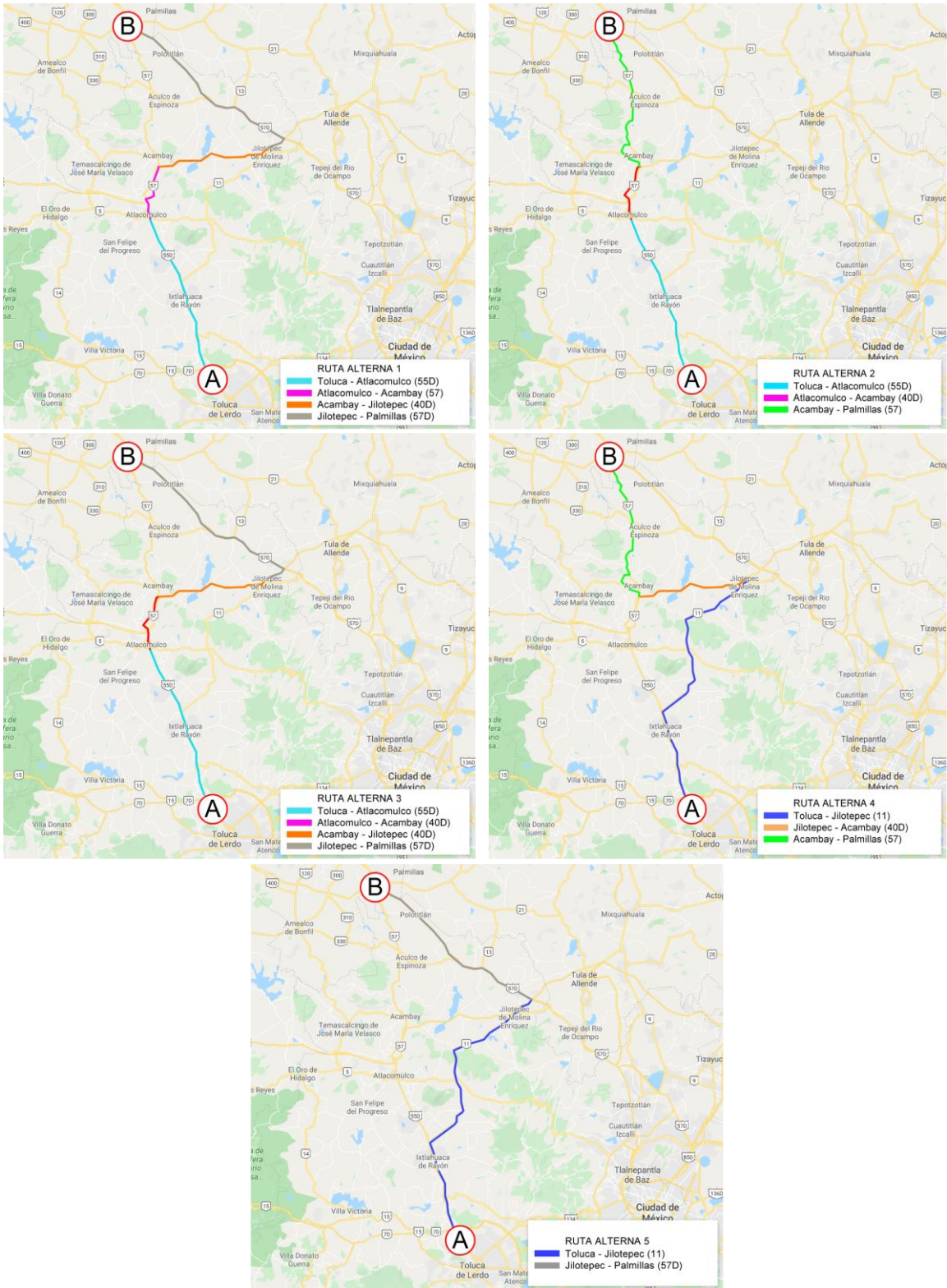


Figura 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 Como se puede observar, la totalidad de las rutas alternas disponibles va del punto “A” al “B” y cada una cumple con alguno de los escenarios propuestos; donde al menos uno de los tramos de la ruta principal se interrumpe (Fuente: elaboración propia)

4.2.4 Datos generales de la red carretera propuesta

Para la determinación de los datos generales de la red, se recurre al resumen de datos viales publicado por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT, dicho documento tiene como fin profundizar en los principales aspectos del transporte carretero nacional y ofrecen al lector los resultados de la implementación de un sistema de conteo vehicular, que permite conocer anualmente los volúmenes y la clasificación del tránsito que circula por las principales carreteras del país (SCT, 2016).

Para cada uno de los subtramos en estudio se obtuvieron los datos viales reportados en la Tabla 4.1, que contemplan la configuración del aforo vehicular y el TDPA reportado:

Subtramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca – Atlacomulco (57)	Atlacomulco – Acambay (57)	Atlacomulco – Acambay (40D)	Acambay – Palmillas (57)	Toluca – Jilotepec (11)	Acambay – Jilotepec (40D)	Jilotepec – Palmillas (57D)
A	79.75%	82.35%	63.50%	77.30%	81.20%	63.70%	68.30%
B	4.00%	2.55%	3.15%	3.65%	4.40%	3.60%	5.20%
C2	7.25%	6.70%	7.55%	7.10%	6.40%	7.05%	6.00%
C3	1.85%	2.00%	3.00%	2.40%	2.30%	2.95%	3.30%
T3S2	4.30%	3.50%	16.60%	6.70%	3.60%	16.25%	9.70%
T3S3	1.55%	1.30%	3.85%	1.80%	1.10%	3.55%	4.00%
T3S2R4	1.10%	1.25%	1.50%	0.70%	0.80%	1.95%	3.10%
OTROS	0.20%	0.35%	0.85%	0.35%	0.20%	0.95%	0.40%
TDPA (1 sentido)	20,554	8,833.5	2,635.5	5,458.5	3,910	2,932	2,2745

Tabla 4.1 Configuración del aforo por tipo de vehículo en los subtramos de estudio, así como el TDPA reportado (Fuente: elaboración propia)

Para el caso de la identificación del tipo de terreno de los subtramos en estudio, se realizaron visitas a campo y recorridos donde se identificó que la mayoría de estos se pueden considerar bajo la clasificación de lomerío y/o montañoso, ya que en todos es fácilmente observable la conformación de pendientes longitudinales marcadas, cimas y depresiones, además de accidentes topográficos notables (SCT, 2018).

Por otra parte, durante los recorridos se logró hacer una inspección visual para obtener una aproximación del IIR de los subtramos antes mencionados. Recordando que la escala de valores de este parámetro contempla desde aquellas carreteras con pocas o nulas imperfecciones en la superficie de rodamiento (IIR = 2 mm/m) hasta aquellas donde se

pueden percibir desprendimientos de agregados y depresiones profundas (IIR = 20 mm/m) (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998). La información recabada se detalla a continuación en la Tabla 4.2:

Subtramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (55D)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud* (m)	45,400	23,300	23,300	53,900	83,100	39,100	67,200
Tipo de terreno*	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR (mm/m)	4	6	4	4	8	4	2
Clasificación SCT**	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles

Tabla 4.2 Principales características de los tramos que conforman a la ruta principal y a las rutas alternas propuestas (Fuente: elaboración propia)

* Distancias obtenidas con el Software Google Earth y Google Maps (Google, 2017)

** Clasificación del subtramo de acuerdo con el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras de la SCT (SCT, 2018)

A partir de la información contenida en el informe de datos viales de 2016, se analizaron las estaciones de medición cercanas a los subtramos en estudio para poder determinar el TDPA esperado en el trayecto Toluca -Palmillas. El procedimiento utilizado fue determinar el aforo al inicio y al final del tramo total para poder determinar el TDPA efectivo, es decir, para el modelo desarrollado se toman en cuenta únicamente los vehículos que efectivamente utilizan el trayecto en su totalidad desde el punto “A” hasta el “B” por la ruta principal. Esta aclaración gira en torno a que como es de esperarse, el número de vehículos que ingresan a cada subtramo difiere del número de vehículos que se reportan al final del mismo, puesto que, estos subtramos son utilizados también por el tránsito local.

Para la obtención del TDPA efectivo, así como de la configuración del aforo vehicular esperado en los subtramos en estudio, se utilizó la información de 14 estaciones de medición auxiliares ubicadas en las carreteras Toluca-Palmillas, Libramiento Norte de la Ciudad de México, y México-Querétaro, particularmente en las locaciones de Atlacomulco, El Dorado, Acambay, Palmillas, Ixtlahuaca, Pastejé y Jilotepec, respectivamente.

Esta información se puede consultar en el Apéndice A y su análisis tuvo como propósito la obtención de los datos más representativos de la ruta principal y de las rutas alternas, entre ellos destacan el TDPA efectivo de la red propuesta que para este caso de estudio es de 4,721 vehículos por día.

Cabe mencionar que una vez conociendo el volumen de vehículos que pasa por el trayecto Toluca-Palmillas, el modelo propuesto realizará iteraciones desviando el 100% de este volumen y su configuración vehicular por las rutas alternas, determinando los costos esperados de cada una y recomendando la mejor opción, es decir, la que genere las menores consecuencias negativas.

Finalmente, una vez identificados los componentes de la red propuesta, se puede establecer su configuración la cual se describe en la Tabla 4.3 y de manera gráfica en las Figura 4.16 a 4.21, las cuales toman como base las características de la ruta principal y las rutas alternas disponibles. Esta configuración o esquema de red servirá de insumo para los modelos numéricos de consecuencias y su aplicación al caso de estudio.

Nodo	Subtramo				Longitud (m)
Ruta Principal	1	2	4	N/A	122.60
Ruta Alternativa 1	1	2	6	7	175.00
Ruta Alternativa 2	1	3	4	N/A	122.60
Ruta Alternativa 3	1	3	6	7	175.00
Ruta Alternativa 4	5	6	4	N/A	176.10
Ruta Alternativa 5	5	7	N/A	N/A	150.30

Tabla 4.3 Conformación de la ruta principal y rutas alternas, así como su longitud total (Fuente: elaboración propia)

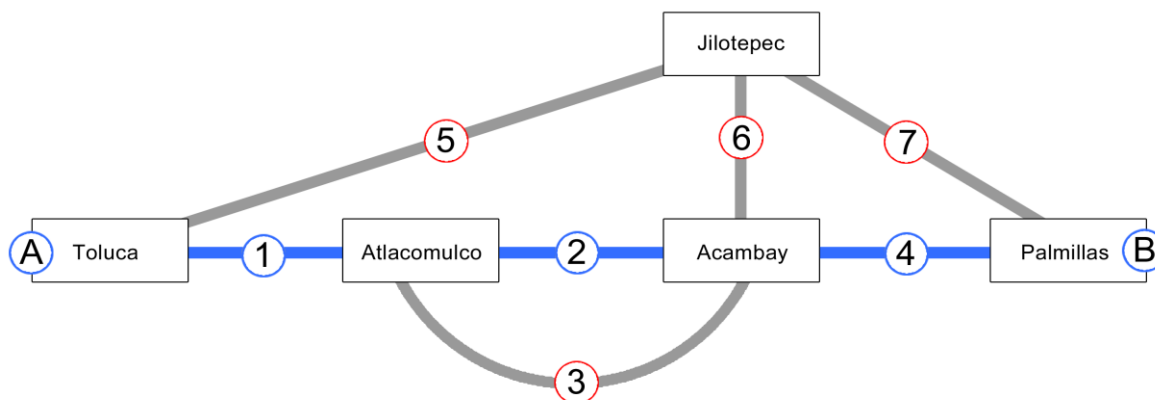


Figura 4.16 Conformación de la ruta principal y subtramos de apoyo para rutas alternas (Fuente: elaboración propia)

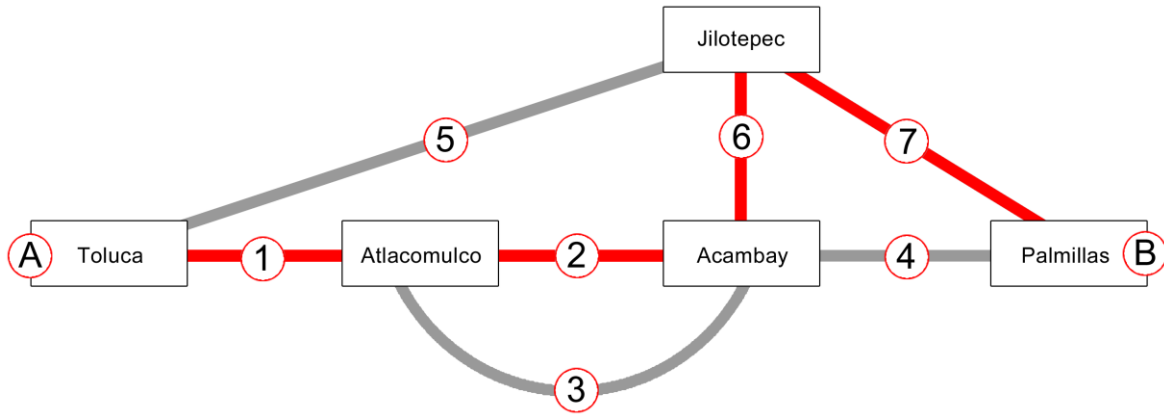


Figura 4.17 Ruta alterna 1, conformada por los tramos 1, 2, 6 y 7 respectivamente (Fuente: elaboración propia)

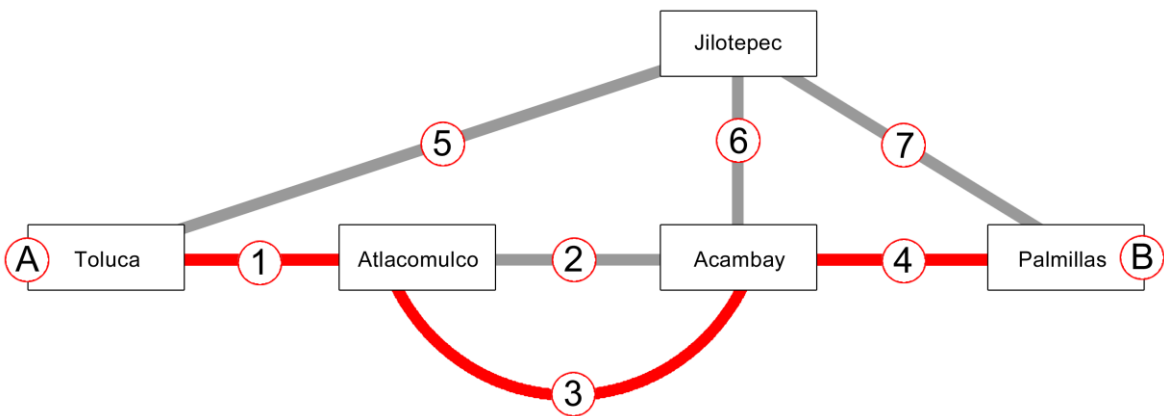


Figura 4.18 Ruta alterna 2, conformada por los tramos 1, 3, y 4 respectivamente (Fuente: elaboración propia)

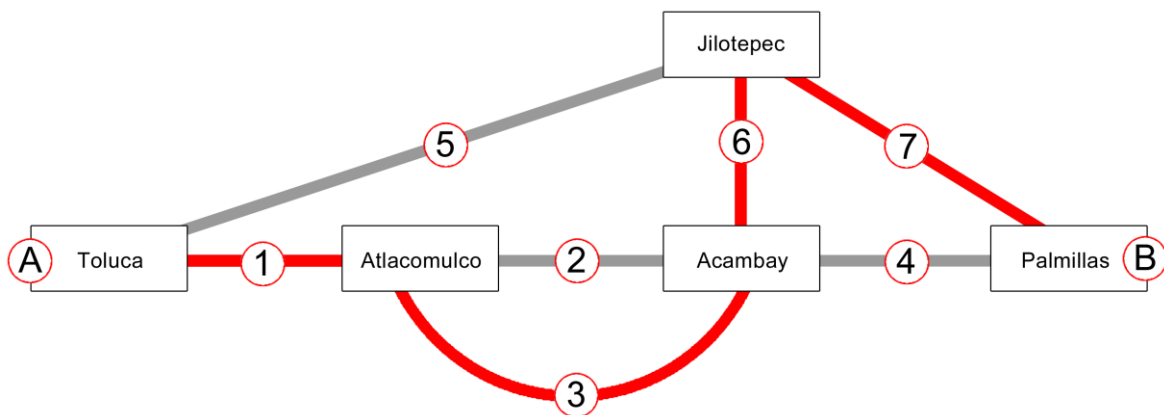


Figura 4.19 Ruta alterna 3, conformada por los tramos 1, 3, 6 y 7 respectivamente (Fuente: elaboración propia)

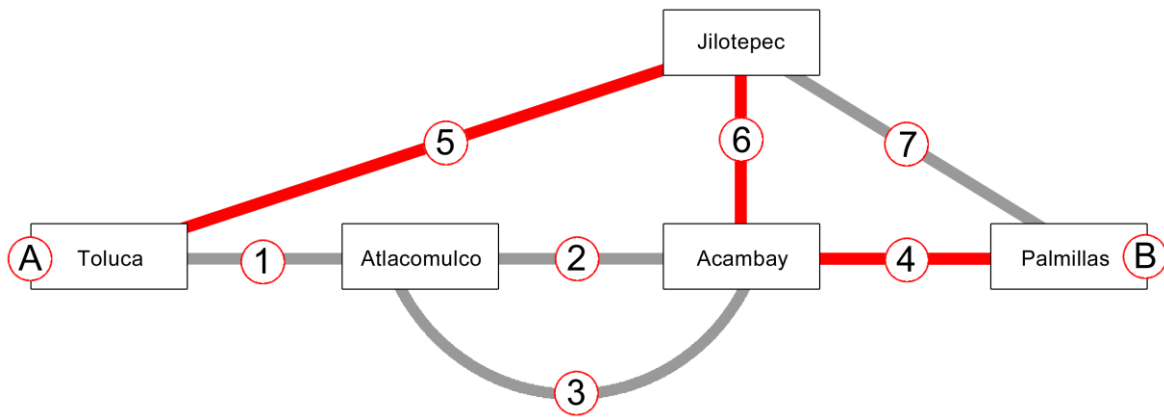


Figura 4.20 Ruta alterna 4, conformada por los tramos 5, 6 y 4 respectivamente (Fuente: elaboración propia)

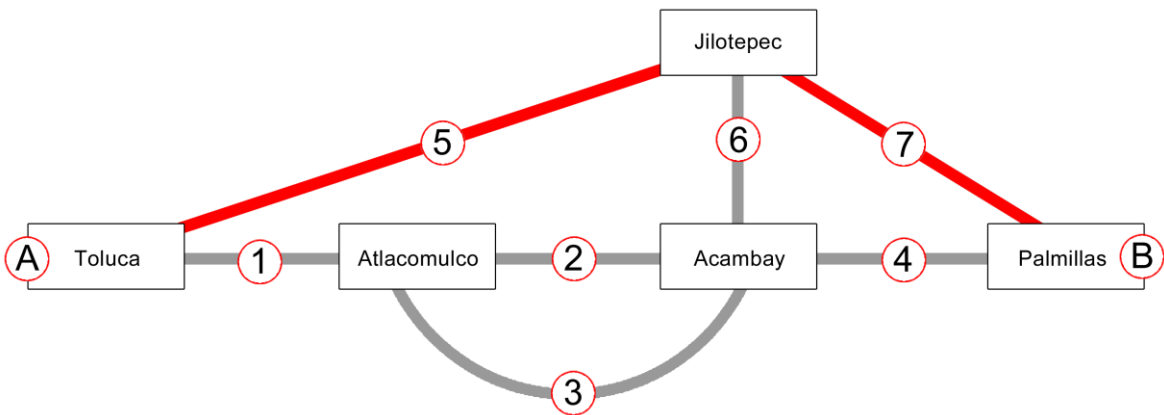


Figura 4.21 Ruta alterna 5, conformada por los tramos 5 y 7 respectivamente (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Figura 4.16, la ruta principal, la cual se encuentra resaltada en un color azul, parte del punto “A” ubicado en Toluca y termina en el punto “B” en Palmillas, está conformada por tres subtramos como ya se vio anteriormente, Toluca-Atlacomulco 55D (Subtramo 1), Atlacomulco-Acambay 57 (Subtramo 2) y Acambay-Palmillas 57 (Subtramo 4). Asimismo, los subtramos 3, 5, 6 y 7 son los tramos de apoyo que forman parte de las 5 rutas alternas (Figuras 4.17 a 4.21) necesarias al quedar inhabilitado alguno de los tres subtramos de la ruta principal.

Una vez definido el esquema de red, se procede a aplicar la metodología propuesta en el capítulo 3 a la red en estudio, como se muestra en el apartado 4.3 descrito a continuación.

4.3 CONSECUENCIAS ESPERADAS PARA EL CASO DE ESTUDIO PROPUESTO

Dado el escenario de la interrupción del servicio en alguno de los subtramos que conforman a la carretera Toluca -Palmillas será necesario recurrir a una de las 5 rutas alternas propuestas

anteriormente. Bajo este supuesto, los usuarios que van del punto “A” al “B” deberán de lograr este cometido sin contar su trayecto cotidiano utilizando parcialmente la ruta principal puesto que alguno de los tres subtramos que la conforman estará interrumpido.

Una vez ocasionada la interrupción en alguno de los subtramos que conforman a la ruta principal, entonces se espera que el paso de los usuarios por un tramo distinto al habitual genere una variación en los tiempos recorrido, distancias de traslado, consumo de combustible, emisiones de contaminantes al medio ambiente y accidentes entre otros. Para lograr una cuantificación de las consecuencias esperadas por estas diferencias en el trayecto Toluca-Palmillas, se hace uso de la clasificación propuesta en el capítulo 3 y de la propuesta metodológica para calcular las consecuencias esperadas ocasionadas por la utilización de una ruta alterna al quedar interrumpida la ruta principal.

4.3.1 Consecuencias socioeconómicas

Como ya se ha mencionado en el capítulo 3, una vez contando con un trayecto establecido, las consecuencias socioeconómicas que se pueden identificar fácilmente al utilizar una ruta alterna en vez de utilizar la ruta principal, dada una interrupción en esta última, son un aumento en el tiempo de traslado así como una disminución en la productividad de los usuarios dado el supuesto de que estos viajan por motivos de trabajo.

Para poder determinar cuánto tiempo de más invertirán los usuarios al desviar su recorrido por una ruta alterna es necesario conocer a fondo las características de cada una de las rutas involucradas tanto de la principal como de las alternas. Sin lugar a dudas, conocer el comportamiento del aforo vehicular es indispensable para poder realizar una comparativa efectiva entre la ruta principal y las rutas alternas disponibles.

Como se puede observar en la Tabla 4.4, los recorridos de la mayoría de las rutas alternas disponibles son más largos comparados con los de la ruta principal, a excepción de la ruta alterna 2 que cuenta con una distancia similar a la de la ruta principal. Derivado a que la distancia de estas rutas es mayor, se espera también que los tiempos de recorrido aumenten en comparación con la ruta principal; este aumento en los tiempos de recorrido mantiene a los usuarios en sus vehículos una mayor cantidad de minutos bajo el volante o como pasajeros, lo que se traduce como fracciones de horas laborales perdidas para poder lograr su cuantificación, la cual se describe en el apartado 4.3.1.1.

Ahora bien, dando por hecho que los tiempos de recorrido de la mayoría de las rutas alternas van a aumentar, se debe de considerar el efecto del tiempo invertido de más dentro de un vehículo pues esto generará un desgaste en los usuarios, por lo que se espera que su rendimiento en el trabajo no sea el esperado. Esta disminución en la productividad en los usuarios, así como su cuantificación se abordan en el apartado 4.3.1.2 bajo el supuesto de que los recorridos se realizan por motivos de trabajo.

4.3.1.1 Pérdidas ocasionas por el aumento de tiempo de traslado

En primer lugar, es primordial conocer el comportamiento del aforo vehicular de los tramos en estudio para lo que se utilizaron estaciones de apoyo para la medición de la SCT como apoyo para la obtención del TDPA y de su composición vehicular. De manera particular, para los tres subtramos que conforman a la ruta principal del trayecto Toluca-Palmillas se tiene la siguiente composición del aforo vehicular y se muestra en la Tabla 4.4 (SCT, 2016).

Subtramo	1		2		4		Porcentaje promedio
	Toluca - Atlacomulco (55D)		Atlacomulco - Acambay (57)		Acambay - Palmillas (57)		
	Estación inicial	Estación Final	Estación inicial	Estación Final	Estación inicial	Estación Final	
	19.403330, - 99.713920	19.783020, - 99.864940	19.808680, - 99.872800	19.964660, - 99.852490	19.916200, - 99.851100	19.923080, - 99.838190	
A	75.90%	83.60%	82.20%	82.50%	82.50%	72.10%	79.80%
B	5.20%	2.80%	2.70%	2.40%	2.40%	4.90%	3.40%
C2	8.50%	6.00%	5.90%	7.50%	7.50%	6.70%	7.02%
C3	2.50%	1.20%	1.90%	2.10%	2.10%	2.70%	2.08%
T3S2	4.60%	4.00%	3.90%	3.10%	3.10%	10.30%	4.83%
T3S3	1.70%	1.40%	1.20%	1.40%	1.40%	2.20%	1.55%
T3S2R4	1.40%	0.80%	1.90%	0.60%	0.60%	0.80%	1.02%
OTROS	0.20%	0.20%	0.30%	0.40%	0.40%	0.30%	0.30%

Tabla 4.4 Conformación del aforo vehicular de los 3 subtramos de la ruta principal a partir de datos viales reportados en 6 estaciones de medición (SCT, 2016)

Asimismo, bajo un escenario de interrupción de alguno de estos subtramos resulta indispensable conocer cuántos vehículos tendrán que ser desviados por alguna de las rutas alternas disponibles. Para esto se utilizan las mismas seis estaciones de medición y los datos referentes al TDPA reportado. Derivado a que estos datos no son del trayecto total que compone a la ruta principal, es necesario realizar una interpretación de los mismos para

determinar la cantidad de vehículos que efectivamente realizan el trayecto desde el punto “A” en Toluca, hasta el punto “B” en Palmillas.

Subtramo	1		2		4	
	Toluca - Atlacomulco (55D)		Atlacomulco - Acambay (57)		Acambay - Palmillas (57)	
	Estación inicial	Estación Final	Estación inicial	Estación Final	Estación inicial	Estación Final
	19.403330,	19.783020,	19.808680,	19.964660,	19.916200,	19.923080,
	-	-	-	-	-	-
	99.713920	99.864940	99.872800	99.852490	99.851100	99.838190
TDPA reportado	25,108	16,000	12,946	4,721	4,721	6,196
TDPAef por subtramo	16,000		4,721		4,721	
TDPAef (Tramo desde “A” hasta B”)	4,721					

Tabla 4.5 TDPA Efectivo para la ruta en estudio, compuesto por los datos viales reportados en 6 estaciones de medición repartidas en los 3 subtramos de interés (SCT, 2016)

Como se puede ver en la Tabla 4.5, es necesario conocer cuántos vehículos efectivamente recorren el trayecto Toluca-Palmillas en su totalidad. De la información de la Tabla se puede concluir que aunque, 25,108 vehículos ingresan a la pista en el subtramo Toluca-Atlacomulco (55D), solamente 4,721 vehículos siguen el trayecto hasta el final del subtramo Atlacomulco-Acambay (57), esto derivado de que algunos usuarios solamente utilizan los subtramos 1 y 2 para poder llegar a municipios aledaños como Ixtlahuaca, Jcotitlán, Jilotepec y Atlacomulco, o bien, para interceptar la autopista Guadalajara-Atlacomulco 15D que no forma parte de la ruta propuesta.

No obstante, aunque al final del subtramo Acambay-Palmillas se reportan 6,196 vehículos, esta diferencia equivalente a 1,475 vehículos, se debe a que durante el trayecto de este último subtramo se incorporan más usuarios de las localidades vecinas como Acambay, Aculco y Polotitlán para dirigirse a sus trabajos en diversas zonas del municipio del estado de Querétaro.

Dado a que tanto a los usuarios que salen en los subtramos 1 y 2 como aquellos que se incorporan en el subtramo 4 no forman parte de los vehículos que utilizan el trayecto completo desde el punto “A” hasta el “B”, el efecto de los mismos no se toma en cuenta en la presente investigación, lo que arroja un TDPA efectivo de 4,721 vehículos por día en la ruta propuesta.

Una vez conocido el TDPA y la configuración vehicular del mismo, se procede a determinar el número de personas por vehículo que transita en el tramo de interés así como la velocidad promedio de los vehículos que transitan por el mismo. Al no contar con los recursos suficientes para realizar estas mediciones en campo se recurre a los Estudios de Origen – Destino realizados por la SCT en los puntos de interés donde se reportan el número promedio de pasajeros por tipo de vehículo en la carretera Toluca-Palmillas (SCT, 2013).

Por otra parte, para la determinación de la velocidad promedio de los vehículos que transitan por el tramo antes mencionado, se utilizan los reportes mostrados en la Publicación Técnica No. 471 del IMT, referente a los costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano (Arroyo Osorno *et al.*, 2016), donde podemos identificar la velocidad de operación esperada de cada tipo de vehículo de acuerdo a su clasificación, esto en función del IIR observado y del tipo de terreno (plano, lomerío o montañoso) del tramo en estudio.

Posteriormente se aplica la metodología descrita en el apartado 3.2.1 para calcular el tiempo que tardarán los usuarios en cada uno de los subtramos de la red tanto los que integran a la ruta principal como aquellos que forman parte de las rutas alternas.

De manera particular, en la Tabla 4.6, se muestra el resumen de los resultados para el subtramo 1, el cual forma parte de la ruta principal así como de las rutas alternas 1, 2 y 3. Cabe mencionar que las corridas para cada uno de los siete subtramos de los que consta la red se pueden consultar en el Apéndice B.

Subtramo 1: Toluca - Atlacomulco (57) TDPA = 4721 d= 45,400m IIR = 4, Tt = Lomerío									
Vehículo	Distribución vehicular	u_i	$u_{efi} = u_i - 1$	N_j	$d_{acumj} = N_j * d$	v_j $f(IIR, T_t)$	$T_j = d/v_j$	$T_p = N_j * v_j$	$T_{(i,j)} = T_p * u_{efi}$
		(personas/vehículo)	(persona/vehículo)	(vehículos)	(m)	(Km/h)	(s/vehículo)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3,767.36	171,038,053.20	65.94	2,478.62	9,337,837.30	11,952,431.74
B	3.40%	12.81	11.81	160.51	7,287,335.60	62.12	2,631.04	422,318.23	4,987,578.24
C2	7.02%	1.37	0.37	331.26	15,039,060.23	53.77	3,039.61	1,006,892.63	372,550.27
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35	4,465,279.17	46.26	3,533.07	347,492.54	79,923.28
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.18	10,359,447.67	50.12	3,260.97	744,094.41	104,173.22
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.18	3,322,167.70	43.36	3,769.37	275,825.73	38,615.60
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	48.00	2,179,056.23	34.00	4,807.06	230,723.60	20,765.12
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.16	643,000.20	50.80	3,217.59	45,570.79	4,101.37
Total									17,560,138.86

Tabla 4.6 Tiempo total acumulado de los usuarios al utilizar el subtramo 1 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, no se toma en cuenta el efecto del operador ya que este se contempla en el modelo de costos operacionales en el apartado 3.3.1, dicho en otras palabras en este modelo solamente se contemplan los efectos de los pasajeros o usuarios efectivos, denotados por la variable u_{efi} , los cuales se obtienen a partir del número de usuarios reportados por tipo de vehículo en el tramo en estudio (SCT, 2013). Por otra parte, la variable d_{acumj} se refiere a la suma de las distancias acumuladas por tipo de vehículo que tendrá que realizar cada uno de estos para recorrer el subtramo en su totalidad.

También es importante mencionar que la determinación de la velocidad promedio del tramo propuesta se obtiene a partir del tipo del terreno así como del IIR observado utilizando los reportes mostrados por el IMT a partir de los resultados obtenidos de la actualización del VOCMEX (Arroyo Osorno *et al.*, 2016).

Asimismo, se puede observar que en las últimas tres columnas de la Tabla 4.6 se realizan los cálculos necesarios para considerar el efecto de la totalidad del aforo vehicular en función del número promedio de personas reportadas por tipo de vehículo, considerando que cada uno de los vehículos tiene que realizar el recorrido completo de 45,400 m de los que consta el subtramo 1, dando como resultado el equivalente a $T_1 = 4,878$ hrs. de recorrido acumuladas por la totalidad de usuarios esperados en los 4,721 vehículos que recorren diariamente este subtramo.

Aplicando el mismo procedimiento se puede obtener el tiempo total acumulado que invertirían cada uno de los usuarios que realizan el recorrido Toluca -Palmillas diariamente al utilizar cualquiera de los siete subtramos de los que consta el modelo de red. En la Tabla 4.7, se muestran estos tiempos de recorrido esperados para el caso de la ruta principal compuesta por los subtramos 1, 2 y 4, así como de las 5 rutas alternas y sus subtramos correspondientes.

Nodo	A	B	C	D	T_{A_i}	T_{B_i}	T_{C_i}	T_{D_i}	T_i
					(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
Ruta principal	1	2	4	N/A	17,560,138.86	11,777,306.23	26,879,277.60	0	56,216,722.73
Ruta alterna 1	1	2	6	7	17,560,138.86	11,777,306.23	15,123,379.50	25,692,750.60	70,153,575.21
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	17,560,138.86	11,619,428.00	26,879,277.60	0	56,058,844.50
Ruta alterna 3	1	3	6	7	17,560,138.86	11,619,428.00	15,123,379.50	25,692,750.60	69,995,696.98
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	34,838,207.48	15,123,379.50	26,879,277.60	0	76,840,864.63
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	34,838,207.48	25,692,750.62	0	0	60,530,958.10

Tabla 4.7 Tiempos de recorrido acumulado para la ruta principal y rutas alternas, donde

$$T_i = T_{A_i} + T_{B_i} + T_{C_i} + T_{D_i} \text{ (Fuente: elaboración propia)}$$

Como se puede observar en la tabla anterior, el nodo “A” de la ruta principal es el subtramo 1, mientras que los nodos “B” y “C”, corresponden a los subtramos 2 y 4 respectivamente. Se introduce el uso de esta notación de apoyo derivado del hecho de que algunos subtramos forman parte de varias rutas alternas o incluso de la ruta principal por lo que conservar una notación numérica pudiera resultar confuso para el lector. Para clarificar lo anterior, sirva de ejemplo comentar que la ruta alterna 5 consta únicamente de dos nodos, es decir, el nodo “A” y “B” siendo estos equivalentes a los subtramos 5 y 7, mientras que la ruta alterna 3 consta de 4 nodos; “A”, “B”, “C” y “D” que corresponden a los subtramos 1, 3, 6 y 7 respectivamente.

Finalmente se calculan las consecuencias esperadas asignándole un costo al tiempo de los usuarios para lo que se recurre a la estimación del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red propuesta, es decir del concepto de SHP (Torres, Hernández, & González, 2016). Como se describe en el apartado 3.2.1, las consecuencias esperadas por el aumento del tiempo generado al utilizar la ruta alterna “i”, en lugar de la ruta principal, se pueden ver como el producto de la diferencia de tiempos de recorrido y el valor del tiempo de los afectados. Para el caso en estudio, los resultados se muestran en la Tabla 4.8.

Cálculo de c_{TT} con $SHP_{2016} = \$43.19$							
Nodo	A	B	C	D	T_i	ΔT_i	$c_{TTi} = \frac{\Delta T_i * SHP}{24 * 3600}$
					(s)	$= T_i - T_{RP}$ (s)	(\$/s)
Ruta principal	1	2	4	N/A	56,216,722.73		
Ruta alterna 1	1	2	6	7	70,153,575.21	13,936,852.47	1.94
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	56,058,844.50	-157,878.23	-0.02
Ruta alterna 3	1	3	6	7	69,995,696.98	13,778,974.24	1.91
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	76,840,864.63	20,624,141.89	2.86
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	60,530,958.10	4,314,235.36	0.60

Tabla 4.8 Cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento del tiempo de traslado al utilizar las diversas rutas alternas (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.8, el incremento de tiempo en los recorridos de los pasajeros que utilizan el trayecto Toluca-Palmillas al recurrir a alguna de las rutas alternas disponibles en lugar de su recorrido cotidiano por la ruta principal, puede traducirse en costos de hasta \$2.86 MXN/s si estos eligieran la ruta alterna 4 para llegar desde el punto “A” hasta el punto “B” siendo esta opción la más desfavorable.

Por otra parte, la ruta alterna 2 pareciera ser la mejor opción puesto que se puede ver incluso un ahorro en tiempos de recorrido de \$0.02 MXN/s, esto se debe a que la diferencia entre esta ruta alterna y la ruta principal es la sustitución del subtramo 2 por el 3, aunque ambos cuentan con la misma longitud, el modelo depende de la variable IIR y al contar el subtramo 3 con una superficie de rodamiento con mejores condiciones y especificaciones se espera que los vehículos alcancen velocidades mayores y, por lo tanto, tiempos de recorrido menores.

Sin embargo, aunque la ruta alterna 2 presenta un ahorro en tiempos de recorrido ($\Delta_{t\%} < 100\%$), el subtramo 3 que es el que lo que diferencia a la ruta alterna de la ruta principal, es un tramo de cuota por lo que se espera que aun siendo una opción más rápida genere consecuencias adversas al obligar a los usuarios a desembolsar un costo extra que no se tenía considerado durante el trayecto diario por la ruta principal. Este efecto se abarca puntualmente en el apartado 4.3.5 del presente capítulo, referente a las consecuencias derivadas por peaje.

4.3.1.2 Pérdidas ocasionas por la baja productividad de los afectados

Como ya se ha mostrado en el apartado anterior, al utilizar una ruta alterna los usuarios llegarán a sus destinos con una diferencia de tiempo considerable (Δ_{T_i}) y esta variación generará a su vez, una afectación al rendimiento de los usuarios durante su jornada laboral.

Para el desarrollo de este modelo (Consultar Apéndice C) se toman en cuenta los datos referentes a la distribución del aforo vehicular y el número de personas promedio por vehículo en el trayecto en estudio. Además de esto es necesario conocer el número de vehículos de acuerdo a su clasificación así como el total aproximado de personas afectadas durante el redireccionamiento de su trayecto (Ver Tabla 4.9), esto nuevamente bajo el supuesto de que la totalidad de los usuarios se trasladan por motivos de trabajo.

Cálculo de u_{d_i} con $TDPA = 4721$				
Vehículo	Distribución vehicular	u_i	N_j	$u_{d_i} = u_j * N_j$
		(persona/vehículo)	(vehículos)	(personas/día)
A	79.80%	2.28	3,767.36	8,589.58
B	3.40%	12.81	160.51	2,056.18
C2	7.02%	1.37	331.26	453.82
C3	2.08%	1.23	98.35	120.98
T3S2	4.83%	1.14	228.18	260.13
T3S3	1.55%	1.14	73.18	83.42
T3S2R4	1.02%	1.09	48.00	52.32
OTROS	0.30%	1.09	14.16	15.44
Total				11,631.86

Tabla 4.9 Resumen de las personas afectadas por día en el trayecto de estudio (Fuente: elaboración propia)

De la tabla anterior se obtiene que diariamente 11,632 personas aproximadamente hacen uso del trayecto Toluca-Palmillas (u_{d_i}), esto en función del TDPA reportado así como del número de usuarios promedio por tipo de vehículo en la ruta de estudio.

Es importante mencionar que para el desarrollo de este modelo se utiliza u_i en lugar de u_{ef_i} ya que para este caso sí se toma en cuenta el efecto en la productividad del operador del vehículo además del efecto del aumento en el tiempo de recorrido en el rendimiento de los pasajeros.

Cálculo de C_{pro_i} con $j_s = 42.793 \text{ hrs/semana}$, $j_e = 5 \text{ días/semana}$ y $S_{min} = \$80.04$							
Variable	T_i	$\Delta_t\% = T_i/T_{RP}$	I_{p_i}	$D_{p_i} = 1 - I_{p_i}$	$J_{p_i} = D_{p_i} * (J_s/J_e)$	$C_{pro_i} = (D_{p_i} * S_{min}) * u_{d_i}$	C_{pro_i}
	(s)	(%)	(%)	(%)	(hrs/día)	(\$/día)	(\$/s)
Ruta principal	56,216,722.73						
Ruta alterna 1	70,153,575.21	124.79%	97%	3%	0.257	27,930.42	0.32
Ruta alterna 2	56,058,844.50	99.72%	100%	0%	0.000	0.00	0.00*
Ruta alterna 3	69,995,696.98	124.51%	97%	3%	0.257	27,930.42	0.32
Ruta alterna 4	76,840,864.63	136.69%	95%	5%	0.428	46,550.70	0.54
Ruta alterna 5	60,530,958.10	107.67%	97%	3%	0.257	27,930.42	0.32

Tabla 4.10 Resumen de las personas afectadas por día en el trayecto de estudio (Fuente: elaboración propia)

***Nota:** Cuando las rutas alternas muestran un $\Delta_t\% < 100\%$, el modelo no genera ningún tipo de consecuencia derivada por la baja productividad de los usuarios, ya que se esperan tiempos de recorrido menores al utilizar esta ruta comparado con el tiempo de recorrido de la ruta principal.

Como se puede observar en la Tabla 4.10 se espera un tiempo de recorrido mayor utilizando la ruta alterna 4, es por eso que esta es la que genera el escenario más desfavorable con consecuencias esperadas equivalentes a \$0.54MXN/s. Este costo equivale a una pérdida del 5% en el rendimiento de los usuarios durante su jornada laboral. Al igual que en el modelo anterior, se puede observar que la ruta alterna 2 sería la mejor opción para los usuarios puesto que es la única ruta que no genera consecuencia alguna derivada del rendimiento de los

usuarios durante su jornada laboral, esto debido a que el tiempo esperado de recorrido por el subtramo 3 (la ruta alterna 2 está compuesta por los subtramos 1, 3 y 4) es menor, comparado con el tiempo de recorrido del subtramo 2 (la ruta principal está compuesta por los tramos 1, 2 y 4).

4.3.2 Consecuencias operacionales

Una vez interrumpida la ruta principal, el 100% del aforo vehicular registrado tendrá que recurrir a una ruta alterna, sin importar las condiciones del camino o las características geométricas del mismo, los operadores tendrán que buscar la ruta más rápida o en el peor de los casos, la única ruta alterna disponible. El incremento en las distancias de recorrido, así como posibles condiciones adversas en las rutas alternas disponibles, tendrá efectos negativos en los vehículos, los cuales se traducen en costos operacionales.

Como ya se ha mencionado en el capítulo 3, para la determinación de los costos de operación de los vehículos se propone la aplicación del modelo desarrollado por el IMT, que es a su vez una adaptación del modelo *Vehicle Operating Costs* (VOC) desarrollado por el Banco Mundial y diversas instituciones educativas y de gobierno con información de países en desarrollo como Kenia, Brasil e India entre otros (IMT, 1991).

La versión de este modelo para la República Mexicana (VOCMEX) se actualiza constantemente y su información se puede consultar en las publicaciones técnicas 20, 30, 202, 282, 316, 337, 368, 407 y 471, respectivamente, donde se pueden consultar los costos de operación básicos de los vehículos representativos del tránsito interurbano en función del alineamiento geométrico y del estado de las carreteras (Arroyo Osorno *et al.*, 2016).

En el siguiente apartado se hace uso de los costos de operación base reportados por el IMT para comparar las rutas disponibles al quedar interrumpido parcialmente el tramo Toluca-Palmillas y poder realizar de esta manera, esto con el objetivo de informar al lector sobre el costo esperado al utilizar alguna de las rutas alternas al no contar con la principal, generando una recomendación sobre la mejor ruta alterna disponible.

4.3.2.1 Incremento en los costos operacionales generados

Una vez conociendo el TDPA del tramo en estudio, además de su configuración vehicular, es posible determinar los costos de operación base por tipo de vehículo si además se conocen las condiciones la superficie de rodamiento y las características del terreno. Utilizando la información mostrada en la publicación técnica N° 471 del IMT, se pueden obtener dichos

costos a partir del IIR observado y del tipo de terreno del tramo (Consultar Apéndice D). En la Tabla 4.11 se muestra el cálculo de los costos de operación base del subtramo Toluca-Atlaacomulco (57) a partir de los parámetros antes mencionados y la distancia recorrida por vehículo.

Subtramo 1: Toluca - Atlaacomulco (57) TDPA = 4721 L= 45,400m IIR = 4, Tt = Lomerío						
Vehículo	Distribución vehicular	N_j	$d_{acum_j} = N_j * L$	COV_j $f(IIR, T_t)$	$C_{opi} = d_j * COV_j$	
		(vehículos)	(m)	(\$/km)	(\$/día)	(\$/s)
A	79.80%	3,767.36	171,038,053.20	4.81	822,693.04	9.52
B	3.40%	160.51	7,287,335.60	17.18	125,196.43	1.45
C2	7.02%	331.26	15,039,060.23	10.66	160,316.38	1.86
C3	2.08%	98.35	4,465,279.17	15.12	67,515.02	0.78
T3S2	4.83%	228.18	10,359,447.67	19.96	206,774.58	2.39
T3S3	1.55%	73.18	3,322,167.70	23.50	78,070.94	0.90
T3S2R4	1.02%	48.00	2,179,056.23	31.16	67,899.39	0.79
OTROS	0.30%	14.16	643,000.20	17.48	11,242.40	0.13
Total					1,539,708.17	17.82

Tabla 4.11 Costos de operación base por tipo de vehículo en el subtramo Toluca – Atlaacomulco (57) (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.11, al utilizar el subtramo 1 se espera que los vehículos generen costos de operación equivalentes a \$17.82MXN/s, siendo los vehículos tipo “A” los que tienen un mayor peso en esta cifra derivado de que el aforo vehicular registrado se conforma en su mayoría por este tipo al alcanzar casi un 80% de los vehículos aforados.

Recordemos que el costo operacional COV_j está conformado por los costos unitarios referentes a los precios de los vehículos y su depreciación, costos vigentes de combustible, costos de los neumáticos y del tiempo de los operadores, así como la mano de obra por mantenimiento de los vehículos. Es posible consultar esta información en el Apéndice D, o bien, directamente en la publicación técnica No. 471 del IMT.

Aplicando el mismo procedimiento se pueden obtener los costos de operación base generados por los diferentes vehículos durante su recorrido por la Toluca-Palmillas diariamente al utilizar cualquiera de los siete subtramos de los que consta el modelo de red. En la Tabla 4.12, se muestran estos costos esperados para el caso de la ruta principal compuesta por los subtramos 1, 2 y 4, así como de las 5 rutas alternas y sus subtramos correspondientes.

Tramo	Subtramos				$C_{op(i,j)}$				$\sum C_{op(i,j)}$	$C_{opi} = C_{opRP} - \sum C_{op(i,j)}$
	A	B	C	D	A	B	C	D	(\$/s)	(\$/s)
Ruta principal	1	2	4	N/A	17.82	11.36	24.94	0.00	54.12	
Ruta alterna 1	1	2	6	7	17.82	11.36	15.35	24.94	69.47	15.35
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	17.82	10.78	24.94	0.00	53.54	-0.58
Ruta alterna 3	1	3	6	7	17.82	10.78	15.35	24.94	68.89	14.77
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	37.16	15.35	24.94	0.00	77.45	23.32
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	37.16	24.94	0.00	0.00	62.10	7.98

Tabla 4.12 Costos de operación base por tipo de vehículo para la ruta principal y rutas alternas, así como el incremento esperado en el costo de operación al utilizar una ruta alterna al quedar interrumpido alguno de los subtramos de la ruta principal (Fuente: elaboración propia)

En la tabla anterior se puede observar que el mayor incremento en los costos de operación vehicular se da al utilizar las rutas 4 y 1, con costos equivalentes a \$23.32/s y \$15.35/s. En otras palabras, se podría generar un costo operacional de hasta \$23.32/s si el 100% del aforo vehicular se redirecciona por la ruta más desfavorable, esto se debe entre otros factores, a que la ruta 4 está conformada por el subtramo 5, que cuenta con un IIR=8, siendo este el que se observó con la superficie de rodamiento más desgastada, sin dejar de lado que la ruta 4 es la que cuenta con la mayor longitud de las cinco rutas alternas disponibles.

Por otro lado, al igual que en el modelo de tiempos de recorrido, la ruta alterna 2 se muestra como la mejor opción al presenta un ahorro en cuanto a los costos de operación base esperados, ya que reporta una cifra negativa en el valor de c_{opi} , esto a causa de que dicha ruta alterna, cuenta con un subtramo de mejores especificaciones y características geométricas (subtramo 3) en comparación con los subtramos que conforman a la ruta principal. En otras palabras, se esperaría que al utilizar la ruta alterna 2 en lugar de la ruta principal los vehículos incluso generaran menores costos operacionales, sin embargo, nuevamente se hace mención de que esta ruta, aunque pudiera resultar en un ahorro en cuanto a costos operacionales se refiere, esta incluye un subtramo con peaje, lo que genera en los usuarios un desembolso extra no considerado durante el trayecto diario por la ruta principal.

4.3.3 Consecuencias al medio ambiente

En el Estado de México el Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero, publicado por la Secretaría del Medio Ambiente (SMAGEM) en conjunto con PRONATURA A.C. y el INECC catalogan al CO₂ como uno de los principales causantes del efecto invernadero, con una aportación del 20.56% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero del Estado (IEECC, 2014). Actualmente, tanto a nivel estatal como a nivel nacional, no existe

infraestructura capaz de darle un tratamiento eficiente al CO₂ para evitar que este siga contaminando la atmósfera.

También es importante mencionar que de acuerdo el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), existen antecedentes de que en nuestro país se ha generado conciencia sobre esta afectación al medio ambiente, como lo fue la iniciativa de la implementación de un impuesto que buscaba gravar las emisiones de con un costo de \$5.7USD por tonelada con el objetivo de incentivar la reducción del uso de combustibles fósiles y contrarrestar el cambio climático (IMCO, 2018). Sin embargo, esta erogación es justamente un impuesto, por lo que no se puede tomar como un indicador para determinar el costo del CO₂.

Por otra parte, aunque existe un mercado bien identificado para lo que se conoce como mercado de emisiones, el pretratamiento y el posterior tratamiento que se le da al CO₂ se realiza directamente en planta y este va enfocado a las emisiones industriales y su control con el fin de generar incentivos en las principales empresas que generan este tipo de emisiones durante los procesos de manufactura de bienes o de generación de insumos. Dado que las emisiones de un vehículo se expiden directamente a la atmósfera sin ningún control, su cuantificación resulta compleja y resulta casi imposible darles un tratamiento directo.

Actualmente existen empresas que se dedican a brindar sus servicios para poder mejorar las condiciones del medio ambiente a partir del tratamiento del CO₂, sin embargo, este procedimiento implica costos elevados que pueden llegar hasta los mil dólares por tonelada. Por lo que resulta de interés dar seguimiento a proyectos en vías de desarrollo proyectos que permiten disminuir esta cifra hasta los \$232USD/ton (Keith et al., 2016).

4.3.3.1 Aumento de emisiones de CO₂ generadas

Una vez identificado el CO₂ como uno de los principales contaminantes expedidos a la atmósfera por parte de los vehículos automotores, se propone su cuantificación como uno de los principales efectos adversos de la interrupción de una ruta carretera a partir de la metodología descrita en el apartado 3.4.1 y el parámetro C_{CO_2} , es decir el costo de mercado por dejar de producir o limpiar una tonelada de CO₂, para el que se propone un valor de \$4,500MXN/ton y que se obtiene de la conversión de dólares a pesos mexicanos del costo por transformar una tonelada de CO₂ de acuerdo a lo visto en el apartado anterior.

Ahora bien, conociendo el valor de la variable C_{CO_2} , así las emisiones promedio de CO_2 por tipo de vehículo, además del TDPA y la configuración del aforo vehicular entre otros, es posible estimar las emisiones de CO_2 esperadas en la ruta en estudio y asignarles un valor en términos monetarios. En la Tabla 4.13 se muestran para el subtramo 1, las emisiones esperadas de CO_2 , así como su costo equivalente:

Subtramo 1: Toluca - Atlacomulco (57) TDPA = 4721, d= 45400 m, $C_{CO_2} = \\$4500MXN/ton$						
Vehículo	Distribución vehicular	N_j	$d_{acum_j} = N_j * d$	E_j	$C_{mai} = C_{CO_2} * d_{acum_j} * E_j$	
		(vehículos)	(m)	(g/km)	(\$/día)	(\$/s)
A	79.80%	3767.36	171038053.20	206.90	159,242.42	1.84
B	3.40%	160.51	7287335.60	426.38	13,982.31	0.16
C2	7.02%	331.26	15039060.23	298.98	20,233.93	0.23
C3	2.08%	98.35	4465279.17	924.03	18,567.28	0.21
T3S2	4.83%	228.18	10359447.67	831.63	38,768.48	0.45
T3S3	1.55%	73.18	3322167.70	1396.25	20,873.57	0.24
T3S2R4	1.02%	48.00	2179056.23	1535.87	15,060.39	0.17
OTROS	0.30%	14.16	643000.20	802.86	2,323.09	0.03
Total					289,051.47	3.35

Tabla 4.13 Costos de las afectaciones al medio ambiente por tipo de vehículo en el subtramo 1 Toluca – Atlacomulco (57)
(Fuente: elaboración propia)

Para la obtención de la columna E_j , es decir, de las emisiones promedio de CO_2 por tipo de vehículo “j” se hace uso del Inventario de Emisiones en Carreteras Federales del Estado de Querétaro (Mendoza Sánchez *et al.*, 2010) ya que en este se incluyen los reportes de emisiones de CO_2 para el recorrido Toluca-Querétaro (55), al cual pertenece el tramo en estudio Toluca-Palmillas.

Aplicando el mismo procedimiento se puede obtener el costo esperado de las emisiones de CO_2 de cada uno de los vehículos que utilizan el recorrido Toluca-Palmillas diariamente en cualquiera de los siete subtramos de los que consta el modelo de red (Consultar Apéndice E). En la Tabla 4.14, se muestran estos costos esperados correspondientes a las emisiones de CO_2 por tipo de vehículo en la ruta principal compuesta por los subtramos 1, 2 y 4 así como de las 5 rutas alternas y sus subtramos correspondientes.

Tramo	Subtramos				$C_{ma(i,j)}$				$\sum C_{ma(i,j)}$	$C_{ma_i} = C_{ma_{RP}} - \sum C_{ma(i,j)}$
	A	B	C	D	A	B	C	D	(\$/s)	(\$/s)
Ruta principal	1	2	4	N/A	3.35	1.72	3.97	0.00	9.03	
Ruta alterna 1	1	2	6	7	3.35	1.72	2.88	4.95	12.90	3.86
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	3.35	1.72	3.97	0.00	9.03	0.00
Ruta alterna 3	1	3	6	7	3.35	1.72	2.88	4.95	12.90	3.86
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	6.12	2.88	3.97	0.00	12.98	3.94
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	6.12	4.95	0.00	0.00	11.08	2.04

Tabla 4.14 Costos equivalentes para la emisión de CO₂ a la atmósfera en la ruta principal y las rutas alternas disponibles
(Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.14, la ruta alterna 2 se muestra nuevamente como la mejor opción dada una interrupción de la ruta principal. En este caso el valor de las emisiones de CO₂ es cero ya que la distancia de la ruta alterna 2 y la ruta principal es la misma y derivado de que este modelo únicamente utiliza a d_j como parámetro de medición.

Por otro lado, se puede observar que las rutas más desfavorables son la ruta 1, 3 y 4 al mostrar los mayores costos esperados en cuanto a emisiones de contaminantes a la atmósfera se refiere. En cuanto a las rutas alternas 1 y 3 se muestra la misma afectación de \$3.86/s derivado de que estas también cuentan con una distancia similar.

4.3.4 Consecuencias de posibles accidentes con víctimas

Como parte de los reportes mostrados en el Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales (Cuevas Colunga *et al.*, 2016) se tienen los datos referentes a los saldos por carretera en el Estado de México. Los informes muestran los resultados para diez cadenamamientos de distintas carreteras federales donde se incluyen la carretera MEX-055 y MEX-057, entre otras. Sin embargo, dichos saldos no corresponden al cadenamamiento del tramo en estudio, es decir, del tramo Toluca-Palmillas por lo que para el trabajo no solamente se tomaron en cuenta los datos referentes a las dos carreteras antes mencionadas sino que se utilizó el promedio de la totalidad de las carreteras en el Estado de México reportadas en el documento para la obtención de C_{Ax} , buscando de esta manera una mayor representatividad en los resultados.

Para el desarrollo de los tres modelos de esta sección es necesario conocer la cantidad de accidentes, además de los decesos y heridos que se pueden dar en un espacio de tiempo determinado, tanto para la ruta principal propuesta para el recorrido Toluca-Palmillas como para las rutas alternas disponibles. Es posible conocer estos datos a partir de la aplicación de

modelos y ecuaciones ya existentes como los contenidos en la Publicación Técnica No. 345 del IMT referente a la definición de indicadores de seguridad vial en la red carretera federal de México (Cuevas Colunga *et al.*, 2011) con los que se puede obtener de manera simplificada un estimado de la cantidad de accidentes, muertes y lesionados por kilómetro en función del TDPA reportado y la clasificación de administrativa del tramo carretero en estudio.

4.3.4.1 Costos materiales esperados en accidentes

Para poder estimar las pérdidas materiales derivadas de los accidentes esperados en los recorridos de los vehículos por las rutas alternas disponibles es necesario conocer el TDPA esperado al redireccionar el aforo vehicular de los subtramos interrumpidos, una vez conocido este indicador además de su clasificación administrativa, se puede obtener un estimado del número de accidentes en el subtramo de interés.

De acuerdo con la Publicación Técnica No. 345 del IMT, el número de accidentes por kilómetro en función de la clasificación de una carretera se puede ver como se muestra en la Tabla 4.15:

Clasificación de la carretera	$A_x = X_1N^2 + Y_1N + Z_1$
CUOTA 4+ Carriles	$-0.0002N^2 + 0.0466N + 0.009$
CUOTA 2 Carriles	$-0.0025N^2 + 0.0743N + 0.0071$
"A" 4+ Carriles	$-0.0003N^2 + 0.0473N + 0.0838$
"A" 2 Carriles	$-0.001N^2 + 0.0654xN - 0.0233$
"B" 4+ Carriles	$-0.0005N^2 + 0.0573N + 0.0866$
"B" 2 Carriles	$-0.0013N^2 + 0.0689N - 0.0249$
"C" 2 Carriles	$-0.0013N^2 + 0.0773N - 0.0638$
"D" 2 Carriles	$-0.0029N^2 + 0.0787N - 0.0208$

Tabla 4.15 Accidentes esperados por kilómetro al año en función de la clasificación carretera y su aforo vehicular. Considerando $N = TDPA/1000$ (Cuevas Colunga et al., 2011)

Aplicando estas ecuaciones a al modelo de red propuesto, se puede obtener el número de accidentes por kilómetro esperados durante un periodo anual, es decir, el parámetro $Ax_{(i,j)}$ para cada uno de los subtramos que conforman a la ruta principal y a las rutas alternas como se puede observar en la Tabla 4.16.

Nodo	Clasificación por subtramo $C_{l(i,j)}$				$Ax_{(i,j)}$			
					(accidentes/km/año)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.48	0.48	0.32	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.48	0.48	0.43	1.14
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.48	0.42	0.32	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.48	0.42	0.43	1.14
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.46	0.43	0.32	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles			0.46	1.14	0.00	0.00

Tabla 4.16 Accidentes esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuestas (Fuente: elaboración propia)

Cabe mencionar que a diferencia de los modelos anteriores donde se utilizó un TDPA efectivo de 4721 vehículos para la ruta de manera general ($TDPA_{ef} = 4721$), en este modelo se utilizaron los TDPA de cada uno de los subtramos de manera individual, afectados a su vez por el efecto del aforo vehicular redireccionado en caso de no formar parte de los subtramos que integran a la ruta principal, esto bajo el supuesto de que el desvío de los vehículos afectados a un subtramo nuevo no considerado en la ruta principal tendrá incidencia en el número de accidentes generados durante el tiempo que estos vehículos utilizan el tramo en cuestión.

De esta manera, para el cálculo de $Ax_{(i,j)}$ el TDPA considerado para los tramos que conforman a la ruta principal se consideró como el reportado por la SCT ($N_i = TDPA_r$), mientras que para los subtramos que no forman parte de la ruta principal se consideró el efecto de los vehículos afectados provenientes de la ruta principal además del reportado ($N_i = TDPA_r + TDPA_{ef}$). Este procedimiento se puede consultar en el Apéndice G.

Finalmente, conociendo la longitud de cada uno de los subtramos $d_{(i,j)}$, así como el costo por accidente en la ruta en estudio C_{Ax} , es posible calcular los costos esperados derivados de la utilización de las rutas alternas al no estar disponible la ruta principal como se muestra en la figura 4.18. Nótese, que el valor de C_{Ax} considerado para el caso de estudio equivale a \$65,728.26 y fue obtenido como el promedio de los costos por accidente reportados en las carreteras federales del Estado de México de acuerdo Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales de 2016. Cabe mencionar que, en esta referencia, los saldos reportados

se encuentran en dólares y para la obtención de la cifra antes mencionada, esta se obtuvo como el promedio del cociente de los daños materiales reportados en un año y el número de colisiones reportadas en el mismo periodo de tiempo para diez tramos de carreteras en el Estado de México. Este procedimiento se puede consultar en el Apéndice F.

Cálculo de los costos por pérdidas materiales C_{pm_i} con $C_{Ax} = \$65,728.26$								
Variable	$d_{(i,j)} * Ax_{(i,j)}$				$\sum(d_{(i,j)} * Ax_{(i,j)})$	$C_{pm_i} = C_{Ax} \sum(d_{(i,j)} * Ax_{(i,j)})$	$C_{pm_i} = C_{pm_{RP}} - C_{pm_i}$	
Tramo	A	B	C	D	(accidentes/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/s)
Ruta principal	21.71	11.24	17.22	0.00	50.16	3,296,858.97		
Ruta alterna 1	21.71	11.24	16.79	76.48	126.20	8,295,206.81	4,998,347.84	0.159
Ruta alterna 2	21.71	9.75	17.22	0.00	48.67	3,199,005.04	-97,853.92	-0.003
Ruta alterna 3	21.71	9.75	16.79	76.48	124.72	8,197,352.88	4,900,493.92	0.156
Ruta alterna 4	38.40	16.79	17.22	0.00	72.41	4,759,126.91	1,462,267.95	0.046
Ruta alterna 5	38.40	76.48	0.00	0.00	114.88	7,550,910.43	4,254,051.47	0.135

Tabla 4.17 Costo esperado por accidentes al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuestas (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.17, la ruta donde se esperaría una mayor cantidad de accidentes y por tanto pérdidas mayores en lo que compete a este indicador, es la ruta alterna 1, pues al utilizarla se esperaría un costo de casi \$0.16/s, además de las rutas 3 y 5 que presentan también costos elevados por pérdidas materiales derivadas de accidentes. Por otra parte, nuevamente la ruta alterna 2 se muestra como la mejor opción pues incluye un tramo con mejores especificaciones, tanto en sus características geométricas como en su estado físico.

4.3.4.2 Costos esperados por decesos en accidentes

Como ya se ha comentado en la sección anterior, existen modelos desarrollados que facilitan la obtención de diversos indicadores referentes a la seguridad vial, de manera particular para el caso de muertes o decesos derivados de accidentes vehiculares el IMT propone el siguiente modelo (Tabla 4.18) para una estimación de este parámetro en función del TDPA reportado, así como de la clasificación de un tramo carretero:

Clasificación de la carretera	$M = X_2N^2 + Y_2N + Z_2$
CUOTA 4+ Carriles	$-0.00009N^2 + 0.01638N + 0.00477$
CUOTA 2 Carriles	$-0.0018N^2 + 0.0374N + 0.0053$
"A" 4+ Carriles	$-0.00005N^2 + 0.00728N + 0.09850$
"A" 2 Carriles	$-0.0003N^2 + 0.0195N + 0.0066$
"B" 4+ Carriles	$-0.0001N^2 + 0.0133N + 0.0466$
"B" 2 Carriles	$-0.0004N^2 + 0.0231N - 0.0066$
"C" 2 Carriles	$-0.0004N^2 + 0.0203N - 0.0006$
"D" 2 Carriles	$-0.0008N^2 + 0.0226N + 0.0029$

Tabla 4.18 Decesos esperados por kilómetro al año en función de la clasificación carretera y su aforo vehicular. Considerando $N = TDPA/1000$ (Cuevas Colunga *et al.*, 2011)

Aplicando estas ecuaciones al modelo de red propuesto, se puede obtener el número de decesos por kilómetro esperados durante un periodo anual, es decir, el parámetro $M_{(i,j)}$ para cada uno de los subtramos que conforman a la ruta principal y a las rutas alternas como se puede observar en la Tabla 4.19.

Nodo	Clasificación por subtramo $C_{l(i,j)}$				$M_{(i,j)}$			
					(accidentes/km/año)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.01	0.17	0.10	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.01	0.17	0.19	0.39
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.01	0.18	0.10	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.01	0.18	0.19	0.39
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.19	0.19	0.10	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles			0.19	0.39	0.00	0.00

Tabla 4.19 Decesos esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuesta (Fuente: elaboración propia)

Finalmente, conociendo la longitud de cada uno de los subtramos $d_{(i,j)}$, así como el costo por cada deceso en la región o tramo en estudio C_M , es posible calcular los costos esperados derivados de la utilización de las rutas alternas al no estar disponible la ruta principal como se muestra en la figura 4.20.

Nótese, que el valor de C_M considerado para el caso de estudio, equivale a \$1MDP, cifra propuesta a partir de consultas realizadas a diversas instituciones bancarias de la región, siendo esta cifra implícita el monto máximo cubierto por seguros de "cobertura amplia" en cuanto a responsabilidad civil por muerte de terceros (Consultar Apéndice H).

Cálculo de los costos por pérdidas humanas C_{mu_i} con $C_M = \$1,000,000.00$								
Variable	$d_{(i,j)} * M_{(i,j)}$				$\sum (d_{(i,j)} * M_{(i,j)})$	$C_{mu_i} = C_M \sum (d_{(i,j)} * M_{(i,j)})$	$C_{mu_i} = C_{mu_{RP}} - C_{mu_i}$	
Tramo	A	B	C	D	(muertes/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/s)
Ruta principal	0.62	3.87	5.30	0.00	9.79	9,787,723.79		
Ruta alterna 1	0.62	3.87	7.28	25.99	37.76	37,757,256.98	27,969,533.19	0.889
Ruta alterna 2	0.62	4.26	5.30	0.00	10.18	10,178,673.86	390,950.07	0.012
Ruta alterna 3	0.62	4.26	7.28	25.99	38.15	38,148,207.04	28,360,483.25	0.902
Ruta alterna 4	16.12	7.28	5.30	0.00	28.70	28,696,498.89	18,908,775.09	0.601
Ruta alterna 5	16.12	25.99	0.00	0.00	42.11	42,113,085.28	32,325,361.49	1.028

Tabla 4.20 Costo esperado por decesos derivados de accidentes al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuestas (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.20, la ruta donde se esperaría una mayor cantidad accidentes y por tanto una mayor cantidad de decesos en lo que compete a este indicador, es la ruta alterna 5, pues al utilizarla se esperaría un costo de casi \$1.03/s, además de las rutas 1 y 3 que presentan también costos elevados derivados de los posibles decesos en accidentes con costos esperados de \$0.89/s y \$0.90/s respectivamente. Por otra parte, nuevamente la ruta alterna 2 se muestra como la mejor opción pues incluye un tramo con mejores especificaciones, tanto en sus características geométricas como en su estado físico, por lo que se esperarían una menor cantidad de accidentes y, por tanto, una menor cantidad de decesos.

4.3.4.3 Costos esperados por heridos en accidentes

La variación de las características de cada ruta, así como las condiciones de esta, determinarán el número promedio de accidentes y estos a su vez podrán ocasionar lesiones y heridos. Para la determinación del número de heridos esperado en el trayecto Toluca-Palmillas, nuevamente se propone la utilización de los modelos propuestos por el IMT en la publicación técnica No. 345 (Tabla 4.21) siendo de esta manera posible obtener el número de heridos en función del TDPA reportado en el tramo en estudio, así como de su clasificación administrativa.

Clasificación de la carretera	$H = X_3N^2 + Y_3N + Z_3$
CUOTA 4+ Carriles	$-0.0001N^2 + 0.0867N + 0.0369$
CUOTA 2 Carriles	$-0.0093N^2 + 0.1872N - 0.0099$
"A" 4+ Carriles	$-0.0006N^2 + 0.0813N + 0.2186$
"A" 2 Carriles	$-0.0026N^2 + 0.1346N - 0.1013$
"B" 4+ Carriles	$-0.0009N^2 + 0.1133N - 0.017$
"B" 2 Carriles	$-0.0023N^2 + 0.1226N - 0.0186$
"C" 2 Carriles	$-0.0024N^2 + 0.1443N - 0.1237$
"D" 2 Carriles	$-0.0056N^2 + 0.1552N - 0.0367$

Tabla 4.21 Heridos esperados por kilómetro al año en función de la clasificación carretera y su aforo vehicular. Considerando $N = TDPA/1000$ (Cuevas Colunga et al., 2011)

Aplicando estas ecuaciones al modelo de red propuesto, se puede obtener el número de heridos por kilómetro esperados durante un periodo anual (Consultar Apéndice I), es decir, el parámetro $H_{(i,j)}$ para cada uno de los subtramos que conforman a la ruta principal y a las rutas alternas como se puede observar en la Tabla 4.22.

Nodo	Clasificación por subtramo $C_{l(i,j)}$				$H_{(i,j)}$			
					(accidentes/km/año)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles		-0.09	0.88	0.59	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	-0.09	0.88	0.88	2.34
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		-0.09	0.86	0.59	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	-0.09	0.86	0.88	2.34
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles		0.91	0.88	0.59	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles			0.91	2.34	0.00	0.00

Tabla 4.22 Heridos esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuesta (Fuente: elaboración propia)

Finalmente, conociendo la longitud de cada uno de los subtramos $d_{(i,j)}$, así como el costo por cada herido en la región o tramo en estudio C_H , es posible calcular los costos esperados derivados de la utilización de las rutas alternas al no estar disponible la ruta principal como se muestra en la figura 4.23. Nótese, que el valor de C_H considerado para el caso de estudio, equivale a \$50,000MXN cifra propuesta a partir de consultas realizadas a diversas instituciones bancarias de la región, siendo esta cifra implícita el monto máximo cubierto por seguros de “cobertura amplia” en cuanto a responsabilidad civil por daño a terceros.

Cálculo de los costos por pérdidas humanas C_{he} con $C_H = \$50,000.00$								
Variable	$d_{(i,j)} * H_{(i,j)}$				$\sum (d_{(i,j)} * H_{(i,j)})$	$C_{he_i} = C_H \sum (d_{(i,j)} * H_{(i,j)})$	$C_{he_i} = C_{he_{RP}} - C_{he_i}$	
Tramo	A	B	C	D	(heridos/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/s)
Ruta principal	-4.14	20.62	31.93	0.00	48.41	2,420,715.44		
Ruta alterna 1	-4.14	20.62	34.33	157.43	208.25	10,412,340.19	7,991,624.74	0.254
Ruta alterna 2	-4.14	20.13	31.93	0.00	47.93	2,396,276.19	-24,439.25	-0.001
Ruta alterna 3	-4.14	20.13	34.33	157.43	207.76	10,387,900.94	7,967,185.49	0.253
Ruta alterna 4	75.87	34.33	31.93	0.00	142.14	7,106,888.45	4,686,173.01	0.149
Ruta alterna 5	75.87	157.43	0.00	0.00	233.31	11,665,316.60	9,244,601.15	0.294

Tabla 4.23 Costo esperado por heridos derivados de accidentes al utilizar la ruta principal y rutas alternas propuestas (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.23, la ruta donde se esperaría una mayor cantidad accidentes y por tanto una mayor cantidad de heridos en lo que compete a este indicador es la ruta alterna 5, pues al utilizarla se esperaría un costo de \$0.29/s, además de las rutas 1 y 3 que presentan también costos elevados derivados de los posibles decesos en accidentes con costos esperados de \$0.254/s y \$0.253/s respectivamente.

Por otra parte, nuevamente la ruta alterna 2 se muestra como la mejor opción pues incluye un tramo con mejores especificaciones, tanto en sus características geométricas como en su estado físico así que se esperarían una menor cantidad de accidentes y, por tanto, una menor cantidad de decesos comparados incluso con los presentados en la ruta principal.

4.3.5 Consecuencias de posibles rutas con peaje

De manera particular, para el modelo de red propuesto existen subtramos libres de peaje y otros que forman parte de una carretera de cuota. Como se puede observar en la Tabla 4.2, los subtramos 1, 3, 5, y 7 pertenecen a carreteras de cuota, ya que forman parte de las carreteras 55D, 40D y 57D, respectivamente.

Para el caso del subtramo 5, aunque no es un tramo de cuota pues pertenece a la Carretera Federal 11, para poder acceso a él desde la Toluca-Atacomulco 55D es necesario pasar por la caseta de cobro “El Dorado”, por lo que para fines del presente trabajo se le considera como un tramo de peaje pero solamente se le asigna el costo correspondiente a una sola de las dos estaciones de cobro de la carretera 55D, puesto que es necesario hacer uso de esta para poder incorporarse al subtramo en cuestión.

Ahora bien, una vez analizado que resulta evidente el hecho de que algunas de las rutas alternas contarán con subtramos sujetos a peaje, se hizo uso de la aplicación oficial “MAPPIR

Traza tu Ruta”, desarrollada por la SCT, que consiste en una herramienta de ayuda para la planeación de viajes por las distintas carreteras del país, despliega en tiempo real el tiempo aproximado del trayecto de interés así como los gastos esperados en gasolina y casetas según el tipo de vehículo para la obtención de las tarifas a considerar en los siete subtramos que integran el modelo de red como se puede ver en la Tabla 4.24.

Subtramo	$P_{(k,j)}$ (\$)						
	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (55D)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
A	68.00	0.00	25.00	0.00	34.00	80.00	77.00
B	163.00	0.00	35.00	0.00	81.50	125.00	154.00
C2	82.00	0.00	35.00	0.00	41.00	125.00	154.00
C3	142.00	0.00	35.00	0.00	71.00	125.00	154.00
T3S2	250.00	0.00	55.00	0.00	125.00	180.00	301.00
T3S3	310.00	0.00	55.00	0.00	155.00	180.00	436.00
T3S2R4	454.00	0.00	95.00	0.00	227.00	295.00	436.00
OTROS	209.86	0.00	47.86	0.00	104.93	158.57	244.57

Tabla 4.24 Tarifas de peaje por tipo de vehículo para los subtramos en estudio, consultado en el portal MAPPIR Traza tu Ruta de la SCT en noviembre de 2017 (SCT, 2017)

4.3.5.1 Costos esperados por peaje en rutas alternas

Una vez conociendo las tarifas por tipo de vehículo en los tramos en estudio “ $P_{(k,j)}$ ”, es posible conocer el costo esperado por peaje en cualquiera de los subtramos de la red si se conoce su TDPA así como la configuración vehicular del mismo. En la Tabla 4.25 se muestran los resultados para el subtramo 1 referentes a los costos esperados por peaje.

Subtramo 1: Toluca - Atlacomulco (57) TDPA = 4721, d= 45400 m				
Vehículo	Distribución vehicular	N_j	P_j	C_{p_j}
		(vehículos)	(g/km)	(\$/s)
A	79.80%	3,767.36	68.00	256,180.34
B	3.40%	160.51	163.00	26,163.78
C2	7.02%	331.26	82.00	27,163.06
C3	2.08%	98.35	142.00	13,966.29
T3S2	4.83% ^C	228.18	250.00	57,045.42
T3S3	1.55%	73.18	310.00	22,684.41
T3S2R4	1.02%	48.00	454.00	21,790.56
OTROS	0.30%	14.16	210.00	2,972.21
		Total		427,966.07

Tabla 4.25 Costos esperados por tarifas de peaje derivadas del paso del aforo vehicular efectivo en el subtramo 1 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.25, se espera que el paso de los 4,721 vehículos por el subtramo 1 genere una derrama económica diaria equivalente a \$427,966.07MXN. Aplicando el mismo procedimiento se puede obtener el costo esperado de para cada uno de los subtramos que componen a la red general y a su vez determinar el costo esperado por peaje C_{pi} en la ruta principal y las rutas alternas propuestas como se muestra en la Tabla 4.26.

Tramo	$C_{pe(i,j)}$				$\sum C_{pe(i,j)}$	$C_{pe_i} = C_{pe_{RP}} - \sum C_{pe(i,j)}$	
	A	B	C	D	(\$/día)	(\$/día)	(\$/s)
Ruta principal	427,966.07	0.00	0.00	0.00	427,966.07		
Ruta alterna 1	427,966.07	0.00	445,803.47	505,943.50	1,379,713.04	951,746.97	11.016
Ruta alterna 2	427,966.07	136,650.47	0.00	0.00	564,616.54	136,650.47	1.582
Ruta alterna 3	427,966.07	136,650.47	445,803.47	505,943.50	1,516,363.51	1,088,397.44	12.597
Ruta alterna 4	213,983.03	445,803.47	0.00	0.00	659,786.50	231,820.43	2.683
Ruta alterna 5	213,983.03	505,943.50	0.00	0.00	719,926.53	291,960.47	3.379

Tabla 4.26 Costos esperados por la utilización de rutas alternas al quedar interrumpido alguno de los subtramos de la ruta principal (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.26, la ruta alterna 2 se muestra nuevamente como la mejor opción dada una interrupción de la ruta principal. En este caso, el valor de las consecuencias esperadas por los peajes no considerados al utilizar esta ruta alterna equivale a \$1.582/s, mientras que las rutas alternas 1 y 3 se muestran como las más desfavorables con costos esperados de \$11.02/s y \$12.59/s respectivamente. El procedimiento completo se puede consultar en el Apéndice J.

4.4 ESCENARIOS DE FALLA

Como se mencionó, el objetivo de la metodología propuesta es determinar cuál de las rutas alternas disponibles es la mejor opción considerando cada una de las consecuencias que se podrían originar (sección 4.3), al desviar a los usuarios de su trayecto cotidiano por la ruta original hacia una de las rutas disponibles.

Para lograr una cuantificación estimada de estas consecuencias se plantea una falla parcial de la ruta principal, es decir, bajo el supuesto de que el paso por alguno de los subtramos de los que está conformada la ruta principal quede impedido.

De manera gráfica las rutas disponibles para cada uno de los escenarios de falla se muestran en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 respectivamente.

Escenario I: se interrumpe el subtramo 1 (Toluca-Atlaconmulco 55D), dado que el subtramo en cuestión forma parte de las rutas alternas 1, 2 y 3, estas no estarán disponibles y los usuarios deberán elegir entre las rutas alternas 4 y 5 para poder realizar el recorrido del punto “A” al “B”.

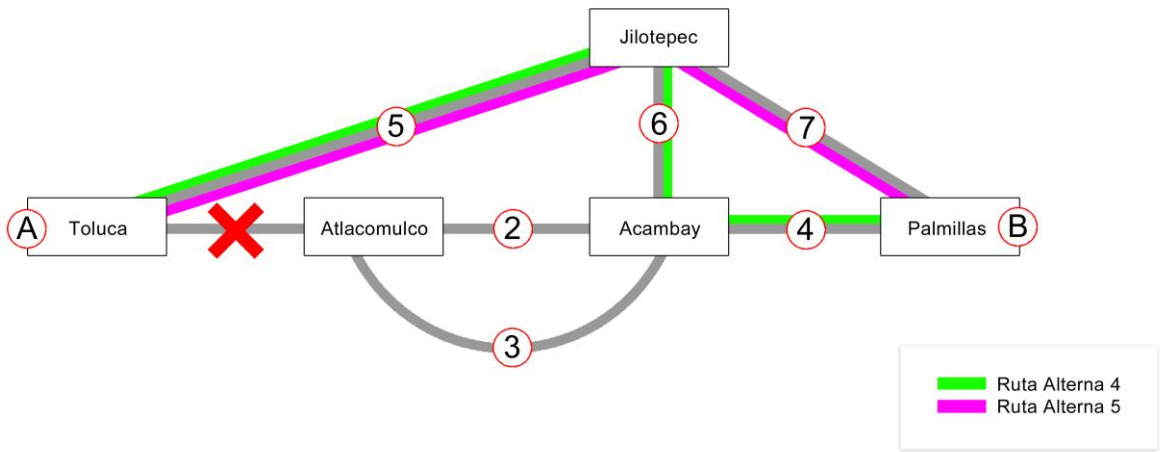


Figura 4.22 Escenario I; rutas disponibles 4 y 5 (Fuente: elaboración propia)

Escenario II: se interrumpe el subtramo 2 (Atlaconmulco-Acambay 57), dado que el subtramo en cuestión forma parte de ruta alterna 1, esta no estará disponible y los usuarios deberán elegir entre las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 para poder realizar el recorrido del punto “A” al “B”.

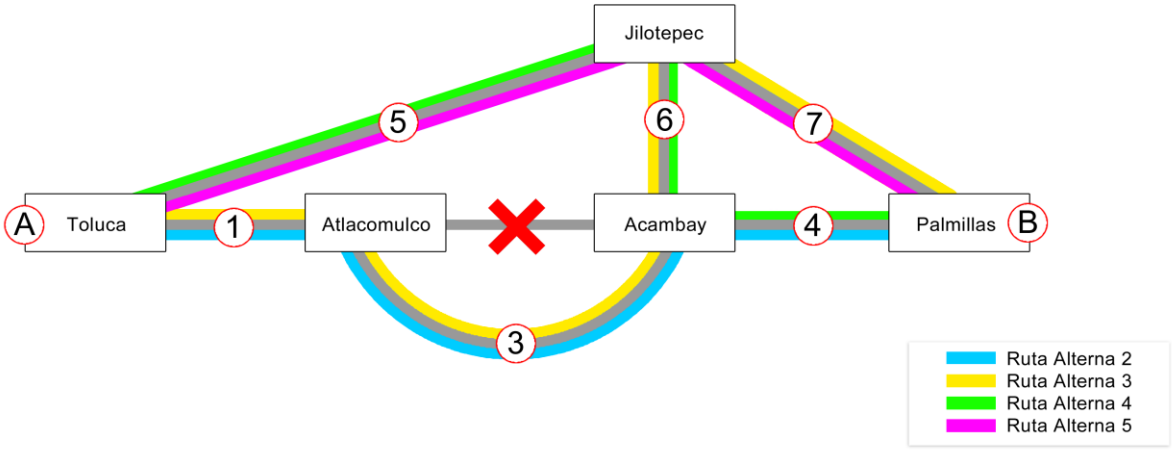


Figura 4.23 Escenario II; rutas disponibles 2, 3, 4 y 5 (Fuente: elaboración propia)

Escenario III: se interrumpe el subtramo 4 (Acambay-Palmillas 57), dado que el subtramo en cuestión forma parte de las rutas alternas 2 y 4, estas no estarán disponibles por lo que los usuarios deberán elegir entre las rutas alternas 1, 3 y 5 para poder realizar el recorrido del punto “A” al “B”.

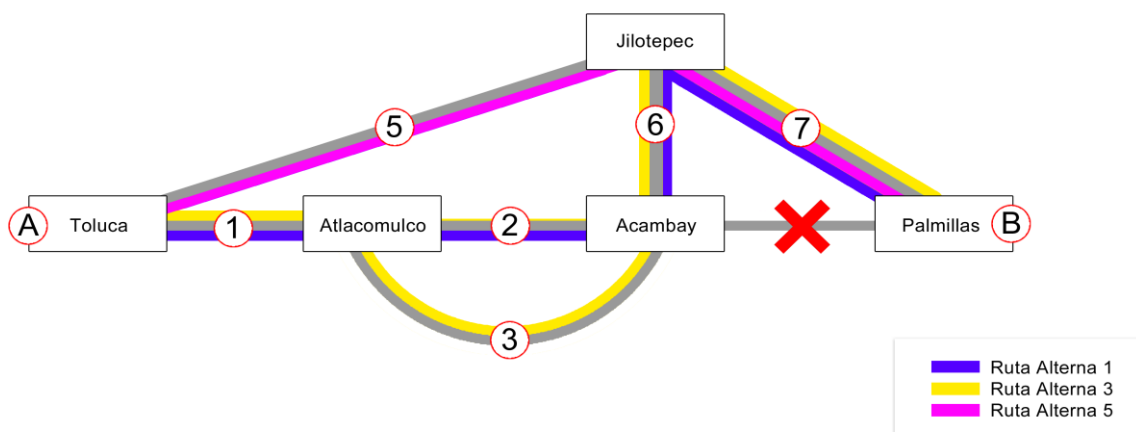


Figura 4.24 Escenario III; rutas disponibles 1, 3 y 5 (Fuente: elaboración propia)

De esta manera, los usuarios deberán elegir una de las rutas alternas disponibles en función de la interrupción de cualquiera de los tres subtramos que conforman a la ruta principal, es decir, los subtramos 1, 2 y 4, como se muestra en la Tabla 4.27:

Ruta alterna	Disponibilidad de la ruta alterna en función del subtramo interrumpido		
	Subtramo 1 interrumpido	Subtramo 2 interrumpido	Subtramo 4 interrumpido
Ruta alterna 1	No Disponible	No Disponible	Disponible
1 2 6 7			
Ruta alterna 2	No Disponible	Disponible	No Disponible
1 3 4 N/A			
Ruta alterna 3	No Disponible	Disponible	Disponible
1 3 6 7			
Ruta alterna 4	Disponible	Disponible	No Disponible
5 6 4 N/A			
Ruta alterna 5	Disponible	Disponible	Disponible
5 7 N/A N/A			

Tabla 4.27 Disponibilidad de las rutas alternas en función del subtramo de la ruta principal interrumpido (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Tabla 4.27, para la red propuesta se tienen 3 escenarios de falla los cuales determinarán las rutas alternas disponibles. En caso de la falla del subtramo 1; Toluca-Atlacomulco 55D, los usuarios solamente podrán elegir entre la ruta alterna 4

(subtramos 5, 6 y 4) y la ruta alterna 5 (subtramos 5 y 7). Para el caso de la falla del subtramo 2; Atlacomulco-Acambay 57, los usuarios tendrán la posibilidad de elegir entre las rutas alternas 2, 3, 4 y 5. Mientras que para el caso de la interrupción del subtramo 4; Acambay-Palmillas 57, los usuarios podrán elegir únicamente entre las rutas alternas 1, 3 y 5.

Ahora bien, una vez conociendo las rutas alternas disponibles, frente a un escenario de falla en particular, es posible determinar cuál de estas será la mejor opción para el usuario en función de las consecuencias esperadas por la utilización de cada una de estas.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados esperados para cada uno de los escenarios propuestos de falla, así como una recomendación sobre las mejores rutas disponibles, con el objetivo de que el usuario considere las consecuencias esperadas en la toma de decisiones al elegir una de las rutas alternas disponibles.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 RESULTADOS

Antes que nada, para la cuantificación de las consecuencias esperadas se recomienda al lector utilizar el modelo de Excel contenido en el Apéndice K, pues resume la metodología propuesta en un modelo con una interfaz amigable y de fácil llenado. De manera particular este documento de ayuda es válido únicamente para tramos carreteros dentro del Estado de México y actualmente se encuentra calibrado para la red en estudio. Por tanto, el modelo en cuestión, únicamente necesita ciertos datos básicos de la red carretera propuesta, los cuales se describen brevemente:

- a) Datos generales de la red carretera: Consiste en nombrar cada uno de los subtramos de la red, soportando el modelo un número máximo de siete subtramos. En este apartado se ingresan de manera manual la longitud de cada subtramo, el tipo de terreno y el Índice de Rugosidad Internacional así como la clasificación administrativa de la carretera. Además de esto, es necesario ingresar la distribución de aforo vehicular de cada uno de los subtramos y las correspondientes tarifas de peaje por tipo de vehículo.

MODELO GENERAL DE CONSECUENCIAS (INGRESAR DATOS)							
A) DATOS GENERALES DE LA RED CARRETERA							
Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (400)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (400)	Jilotepec - Palmillas (570)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
Clasificación	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles
Distribución del aforo vehicular de los tramos en condiciones normales de aforo							
A	79.75%	82.35%	63.50%	77.30%	81.20%	63.70%	68.30%
B	4.00%	2.55%	3.15%	3.65%	4.40%	3.60%	5.20%
C2	7.25%	6.70%	7.55%	7.10%	6.40%	7.05%	6.00%
C3	1.85%	2.00%	3.00%	2.40%	2.30%	2.95%	3.30%
T3S2	4.30%	3.50%	16.60%	6.70%	3.60%	16.25%	9.70%
T3S3	1.55%	1.30%	3.85%	1.80%	1.10%	3.55%	4.00%
T3S2R4	1.10%	1.25%	1.50%	0.70%	0.80%	1.95%	3.10%
OTROS	0.20%	0.35%	0.85%	0.35%	0.20%	0.95%	0.40%
TDPA (1 sentido)	20554	8833.5	2635.5	5458.5	3910	2932	22745
Tarifas de peaje para rutas seleccionadas							
A	\$ 68.00	\$ -	\$ 25.00	\$ -	\$ 34.00	\$ 80.00	\$ 77.00
B	\$ 163.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 81.50	\$ 125.00	\$ 154.00
C2	\$ 82.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 41.00	\$ 125.00	\$ 154.00
C3	\$ 142.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 71.00	\$ 125.00	\$ 154.00
T3S2	\$ 250.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 125.00	\$ 180.00	\$ 301.00
T3S3	\$ 310.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 155.00	\$ 180.00	\$ 436.00
T3S2R4	\$ 454.00	\$ -	\$ 95.00	\$ -	\$ 227.00	\$ 295.00	\$ 436.00
OTROS	\$ 209.86	\$ -	\$ 47.86	\$ -	\$ 104.93	\$ 158.57	\$ 244.57

Figura 5.1 Captura de pantalla realizada al apartado de *Datos Generales* del Modelo General de Consecuencias en Excel (Fuente: elaboración propia)

- b) Configuración de la ruta principal y rutas alternas: En este apartado se muestran al usuario los subtramos disponibles para que se elijan cuáles formarán parte de la ruta principal. Asimismo, se da la opción de cargar hasta 5 rutas alternas conformadas por cualquiera de los 7 subtramos dados de alta en el punto anterior. Es importante mencionar que en esta sección se deberá de ingresar el TDPA efectivo de la ruta propuesta, es decir, el número de vehículos que efectivamente realizan el recorrido desde el primero hasta el último nodo de la red principal. Por último, se da a elegir al usuario cuál será el subtramo interrumpido de entre aquellos que conforman a la ruta principal, es decir, se establece el escenario de falla propuesto.

B) CONFIGURACIÓN DE LA RUTA PRINCIPAL Y RUTAS ALTERNAS				
Nodo	A	B	C	D
Ruta Principal	1	2	4	N/A
Ruta Alternativa 1	1	2	6	7
Ruta Alternativa 2	1	3	4	N/A
Ruta Alternativa 3	1	3	6	7
Ruta Alternativa 4	5	6	4	N/A
Ruta Alternativa 5	5	7	N/A	N/A
TDPAef*	4721	* (TDPA EFECTIVO; ES EL QUE EXCLUSIVAMENTE VA DEL PRIMER AL ÚLTIMO PUNTO DE LA RUTA PRINCIPAL)		
Tramo interrumpido	4	Es el tramo que dejará de operar y que ocasiona la búsqueda de rutas alternas para llegar al destino		
NOTA: No se puede elegir N/A				

Figura 5.2 Captura de pantalla realizada al apartado de *Configuración de Rutas* del Modelo General de Consecuencias en Excel (Fuente: elaboración propia)

- c) Datos complementarios: Consiste en el ingreso manual de parámetros vigentes de los cuales se alimenta el modelo como lo son las variables correspondientes a las horas laborables promedio en la región geográfica, pólizas de vida y accidentes, costo de mercado vigente por dejar de producir o limpiar una tonelada de CO₂, así como el valor del tiempo por motivo de trabajo, salario mínimo vigente y tipo de cambio del dólar a peso mexicano entre otros.

C) DATOS COMPLEMENTARIOS			
Variable	Valor	Unidad	Descripción
Js	42.793	hr/semana	Horas laborables promedio a la semana (EdoMex)
Cmu	\$ 1,000,000.00	\$	Costo por deceso en accidente automovilístico
Cher	\$ 50,000.00	\$	Costo por herido en accidente automovilístico
CL	\$ 4,500.00	\$/ton	Costo de mercado por dejar de producir / limpiar una tonelada de CO2
SHP	43.19	\$/hr	Valor del tiempo por motivo de trabajo del periodo en estudio
Sm	80.04	\$/día	Salario Mínimo vigente área geográfica única
\$\$	18.16	\$	Costo del dólar en MXN

Figura 5.3 Captura de pantalla realizada al apartado de *Datos Complementarios* del Modelo General de Consecuencias en Excel (Fuente: elaboración propia)

Una vez realizada la captura de datos, el modelo se actualiza automáticamente y los resultados son desplegados en la pestaña Modelo General de Consecuencias (MGC), donde se pueden consultar los resultados esperados para el escenario de falla propuesto dentro del apartado 11 del mismo. Cabe mencionar que los resultados se despliegan por tipo de consecuencia y, estos a su vez, provienen de pestañas o subrutinas correspondientes a la clasificación de consecuencias propuesta en el presente trabajo.

11. Resumen de Consecuencias		Subtramo Interrumpido =				4
Modelo	Identificador	Ruta Alterna 1	Ruta Alterna 2	Ruta Alterna 3	Ruta Alterna 4	Ruta Alterna 5
MODELO I	CTT	1.935	Ruta inválida	1.913	Ruta inválida	0.599
MODELO II	CPRO	0.323	Ruta inválida	0.323	Ruta inválida	0.323
MODELO III	COP	15.349	Ruta inválida	14.767	Ruta inválida	7.977
MODELO IV	CMA	3.861	Ruta inválida	3.861	Ruta inválida	2.041
MODELO V	CAX	0.159	Ruta inválida	0.156	Ruta inválida	0.135
MODELO VI	CMU	0.889	Ruta inválida	0.902	Ruta inválida	1.028
MODELO VII	CHE	0.254	Ruta inválida	0.253	Ruta inválida	0.294
MODELO VIII	CPE	11.016	Ruta inválida	12.597	Ruta inválida	3.379
TOTAL	(\$/s)	33.787	Ruta inválida	34.773	Ruta inválida	15.777
Ruta que genera las menores consecuencias:				Ruta Alterna 5		
Valor de las consecuencias al utilizar esta ruta:				15.777	(\$/s)	

Figura 5.4 Captura de pantalla realizada al apartado de *Resumen de Consecuencias* del Modelo General de Consecuencias en Excel (Fuente: elaboración propia)

A continuación, se muestran los resultados para los tres escenarios de falla propuestos de la red en estudio donde, como se comentó en el capítulo anterior, se interrumpe alguno de los tres subtramos por los que está compuesto el recorrido Toluca-Palmillas obligando a los usuarios a buscar rutas alternas. Cabe mencionar que para su obtención se hizo uso del Modelo General de Consecuencias realizado en Excel antes descrito utilizando datos vigentes de la región.

5.1.1 Resultados para el escenario de falla I

En este apartado se genera la interrupción del subtramo 1: Toluca -Atlacomulco (55D), el cual forma parte de la ruta principal, además de las rutas alternas 1, 2 y 3, por lo que éstas tampoco estarán disponibles para los usuarios. De esta manera, los usuarios solamente podrán elegir entre las rutas alternas 4 y 5 como se muestra en la Tabla 5.1. Como es de esperarse, la variación en las condiciones de las rutas disponibles con respecto a la ruta principal tendrá

efectos en los vehículos y usuarios que diariamente realizan el recorrido Toluca-Palmillas, ocasionando consecuencias en su mayoría adversas. Las consecuencias esperadas por la utilización de las rutas alternas 4 y 5 al quedar interrumpido el subtramo 1, se observan a continuación:

Consecuencias esperadas para el escenario I (\$/s)						
Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	2.864	0.599
MODELO II	CPRO	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	0.539	0.323
MODELO III	COP	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	23.324	7.977
MODELO IV	CMA	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	3.942	2.041
MODELO V	CAX	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	0.046	0.135
MODELO VI	CMU	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	0.601	1.028
MODELO VII	CHE	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	0.149	0.294
MODELO VIII	CPE	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	2.683	3.379
TOTAL	C	Ruta inválida	Ruta inválida	Ruta inválida	34.149	15.777

Tabla 5.1 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 1 (Fuente: elaboración propia)

De las dos rutas disponibles, es decir, las rutas alternas 4 y 5 respectivamente, se puede observar que la ruta alterna que genera menores consecuencias es la ruta alterna 5, compuesta por los subtramos Toluca-Jilotepec (11) y Jilotepec-Palmillas (57D), donde se espera que el paso de los 4721 vehículos que recorren diariamente el trayecto Toluca-Palmillas, generen costos de aproximadamente \$15.77/s dado que el subtramo interrumpido, esto es, el subtramo 1, es indispensable para la ruta principal, siendo este el de mayor longitud y de mejores especificaciones. Aun así, los vehículos podrán elegir además de la ruta alterna 5, la ruta 4, sin embargo, se esperan consecuencias equivalentes al doble de aquellas esperadas por el uso de la ruta 5. Esta comparación se puede ver en la Figura 5.5.

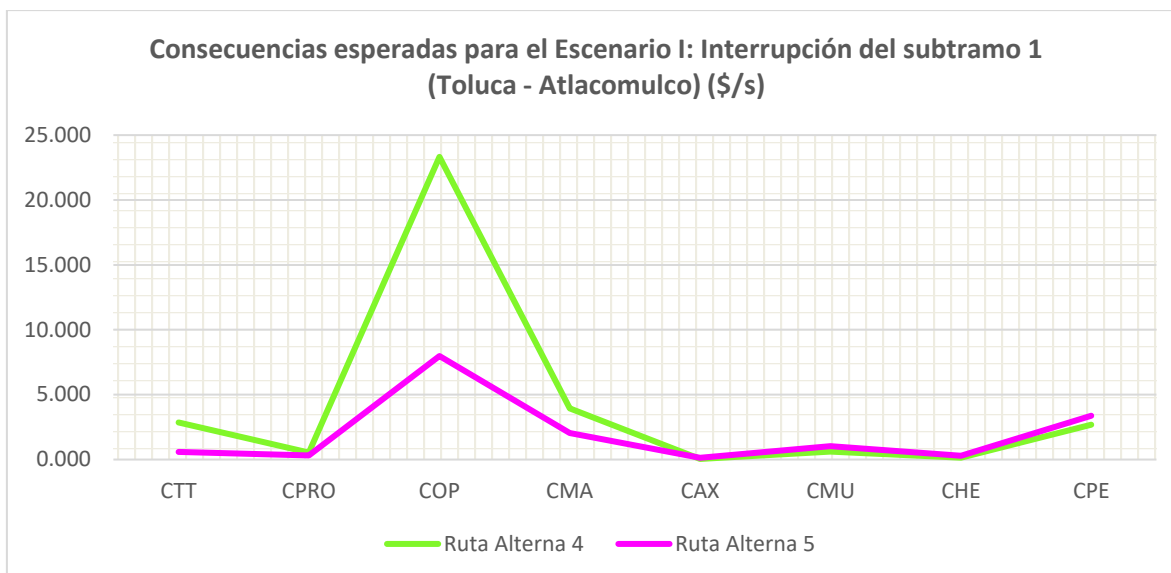


Figura 5.5 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 1 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede ver en la figura anterior, las consecuencias esperadas derivadas del aumento del tiempo de recorrido, además de aquellas ligadas a la productividad de los usuarios, así como las ocasionadas por pérdidas materiales, decesos, heridos y peaje en ambas rutas son similares. Sin embargo, en la ruta alterna 4 se pueden observar consecuencias derivadas de los costos de operación base de los vehículos redireccionados así como de las afectaciones al medio ambiente, las cuales superan en gran medida a las presentadas en la ruta 5, principalmente ocasionado por a la diferencia de longitudes entre ambas rutas, dado que la ruta 4 representa un recorrido de más de 25 kilómetros extra comparada al de la ruta alterna 5.

Para el caso de la ruta alterna 4, se observa que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 68% de las consecuencias totales, seguidas por un 12% correspondiente a las afectaciones al medio ambiente, mientras que se espera que el 8% de las consecuencias totales sea ocasionado por los aumentos de tiempo de recorrido así como los cobros de peaje necesarios para poder utilizar los subtramos que componen a esta alternativa (Ver Figura 5.6).

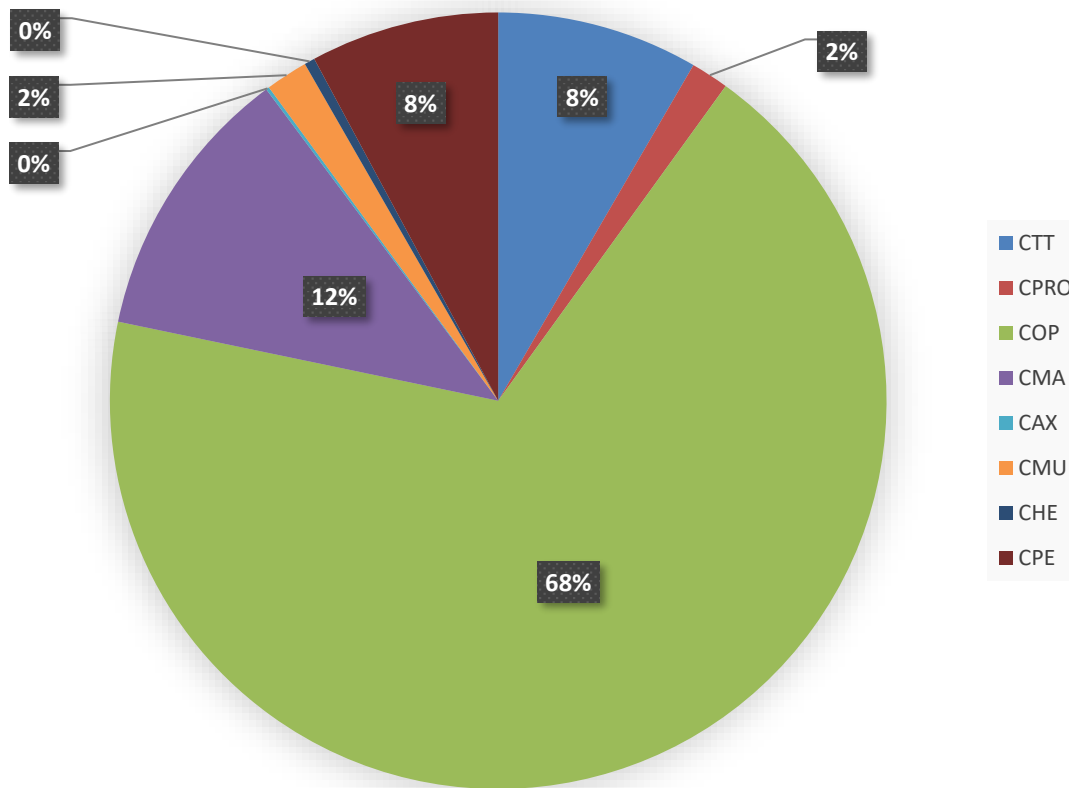


Figura 5.6 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 4 (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, para el caso de la ruta alterna 5, se puede observar que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 51% de las consecuencias totales, seguidas por un 21% correspondiente a las tarifas derivadas por peaje de los subtramos que conforman a esta alternativa. Asimismo, las afectaciones al medio ambiente representan un 13% de las consecuencias totales esperadas si se elige esta alternativa, mientras que el 6% corresponde a decesos en carreteras seguido por el 4% correspondiente al aumento de tiempos de recorrido (Ver Figura 5.7).

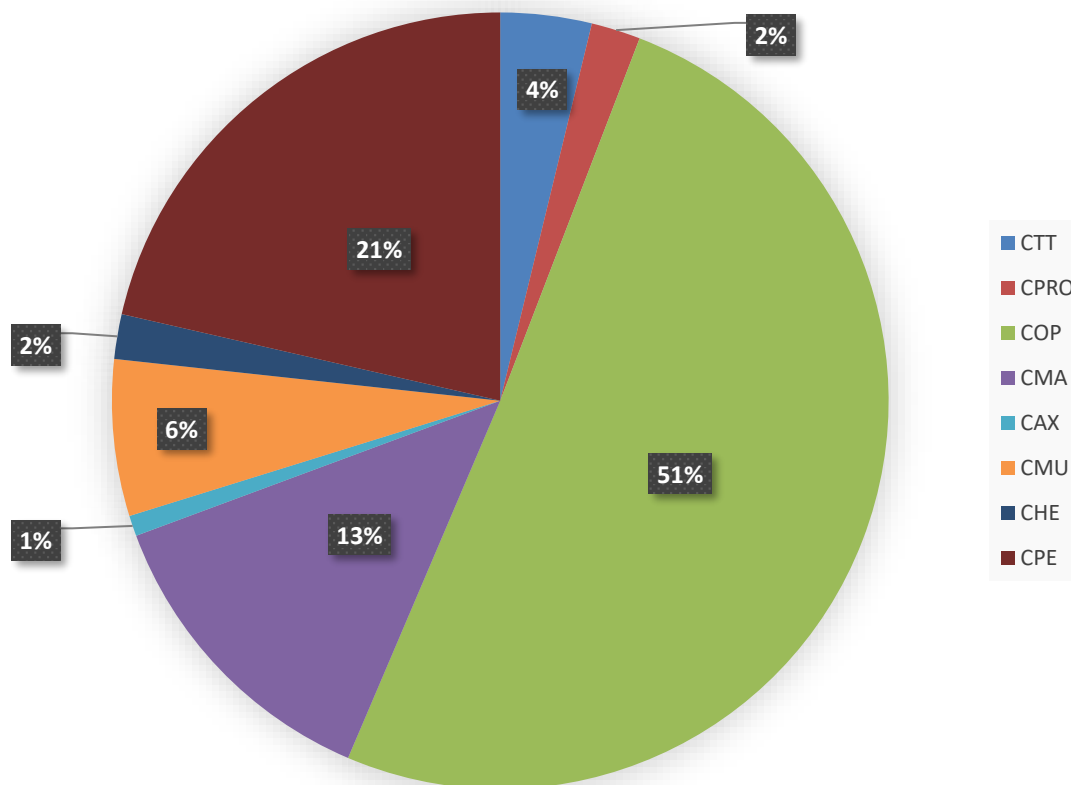


Figura 5.7 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5 (Fuente: elaboración propia)

5.1.2 Resultados para el escenario de falla II

En este apartado se genera la interrupción del subtramo 2: Atlacomulco-Acambay (57), el cual forma parte de la ruta principal, además de la ruta alternas 1, por lo que esta tampoco estará disponible para los usuarios. De esta manera, los usuarios solamente podrán elegir entre las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 como se muestra en la Tabla 5.2.

Como es de esperarse, la variación en las condiciones de la ruta disponible con respecto a la ruta principal, tendrá efectos en los vehículos y usuarios que diariamente realizan el recorrido Toluca-Palmillas, ocasionando consecuencias en su mayoría adversas. Las consecuencias esperadas por la utilización de las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 al quedar interrumpido el subtramo 2, se observan a continuación:

Consecuencias esperadas para el escenario II (\$/s)						
Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	Ruta inválida	-0.022	1.913	2.864	0.599
MODELO II	CPRO	Ruta inválida	0.000	0.323	0.539	0.323
MODELO III	COP	Ruta inválida	-0.582	14.767	23.324	7.977
MODELO IV	CMA	Ruta inválida	0.000	3.861	3.942	2.041
MODELO V	CAX	Ruta inválida	-0.003	0.156	0.046	0.135
MODELO VI	CMU	Ruta inválida	0.012	0.902	0.601	1.028
MODELO VII	CHE	Ruta inválida	-0.001	0.253	0.149	0.294
MODELO VIII	CPE	Ruta inválida	1.582	12.597	2.683	3.379
TOTAL	(\$/s)	Ruta inválida	0.987	34.773	34.149	15.777

Tabla 5.2 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 2 (Fuente: elaboración propia)

De las cuatro rutas disponibles, es decir, las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 respectivamente, se puede observar que la ruta alterna que genera menores consecuencias es la ruta alterna 2, compuesta por los subtramos Toluca-Atlaconulco (55D), Atlaconulco-Acambay (40D) y Acambay-Palmillas (57), donde se espera que el paso de los 4721 vehículos que recorren diariamente el trayecto Toluca-Palmillas, generen costos de aproximadamente \$0.99/s dado que el subtramo interrumpido, esto es, el subtramo 2, cuenta con una longitud similar al que lo sustituye en esta ruta alterna, es decir, el subtramo 3. Además de ello, el subtramo 3 cuenta con mejores especificaciones que el subtramo 2, por lo que la utilización de esta ruta alterna presenta incluso ahorros en algunos de los modelos de consecuencia elaborados. Aun así, el subtramo 2 es un tramo libre de peaje mientras que el subtramo 3, que conforma a esta alternativa, tiene una caseta de cobro por lo que también se espera que la suma de las consecuencias sea adversa para el usuario.

Por otra parte, los usuarios podrán utilizar las rutas alternas 3, 4 y 5 presentándose esta última como la segunda mejor opción mientras que en la utilización de las rutas 3 y 4 se esperan consecuencias similares mayores a los \$34/s siendo éstas las opciones más desfavorables esperadas por el uso de la ruta 4. La comparación entre las rutas disponibles para este escenario se puede ver en la Figura 5.8.

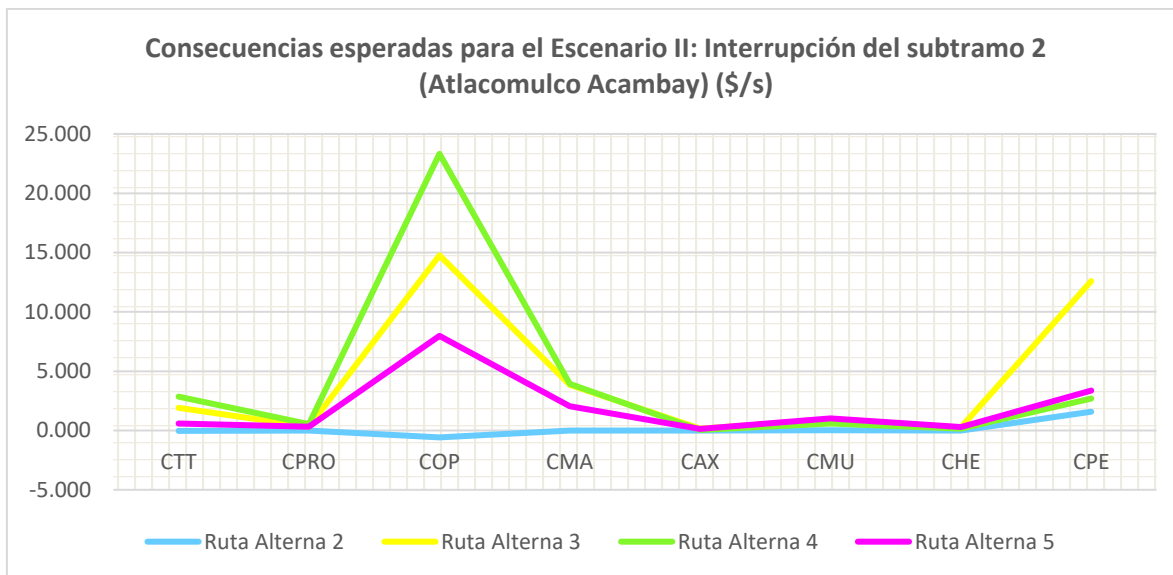


Figura 5.8 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 2, 3, 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 2 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede ver en la figura anterior, las consecuencias esperadas derivadas de la disminución de la productividad de los afectados además de aquellas ligadas a las pérdidas materiales en accidentes así como las esperadas por decesos y heridos son muy similares para las cuatro rutas disponibles. Por otra parte, las diferencias mayormente marcadas se pueden ver en las consecuencias ocasionadas por los costos de operación base así como las afectaciones al medio ambiente ocasionadas por el redireccionamiento de los vehículos afectados.

Ahora bien, se puede observar que en el caso de las consecuencias derivadas por peaje las rutas alternas 2, 4 y 5 presentan valores muy parecidos, sin embargo, en el caso de la ruta alterna 3 esta se conforma en su totalidad por subtramos con casetas de cobro por lo que se distingue fácilmente que, en el caso de esta ruta, el valor esperado para esa variable se aleja del esperado en las otras alternativas disponibles. Las consecuencias derivadas por costos de operación de los vehículos son las que presentan un costo mayor, siendo ejemplo de esto la ruta 4, donde se esperan costos de operación mayores a los \$23/s.

La composición de las consecuencias de cada una de las rutas alternas disponibles dado este escenario de falla se puede observar en las Figuras 5.9 a 5.12.

Para el caso de la ruta alterna 2, se observa que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo derivado del peaje ya que cuenta con un subtramo de cobro, representando un 72% de las consecuencias totales, seguidas por un 26%

correspondiente a los costos operacionales de los vehículos, recordando que este concepto toma en cuenta el desgaste de los vehículos como llantas, el mantenimiento, entre otros (Ver Figura 5.9).

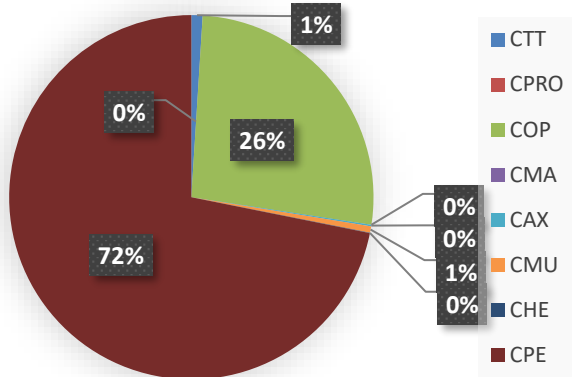


Figura 5.9 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 2 (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, en la ruta alterna 3 se pueden identificar las consecuencias derivadas por el peaje y las ocasionadas por los costos operacionales de los vehículos que tienen un peso similar con el 36% y 42% respectivamente. Además, se puede observar que el 11% de las consecuencias esperadas corresponden a afectaciones al medio ambiente mientras que el costo esperado por el aumento del tiempo en el recorrido por esta alternativa equivale al 6% del total de las consecuencias (Ver Figura 5.10).

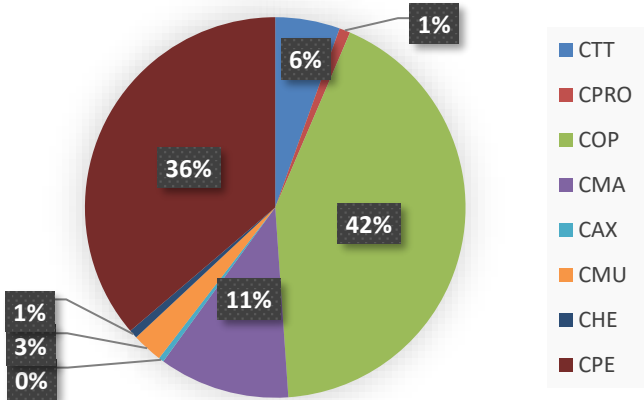


Figura 5.10 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 3 (Fuente: elaboración propia)

Respecto a la ruta alterna 4, se observa que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 68% de las consecuencias totales, seguidas por un 12% correspondiente a las afectaciones al medio ambiente mientras que se espera que el 8% de las consecuencias totales sea ocasionado por

los aumentos de tiempo de recorrido así como los cobros de peaje necesarios para poder utilizar los subtramos que componen a esta alternativa (Ver Figura 5.11).

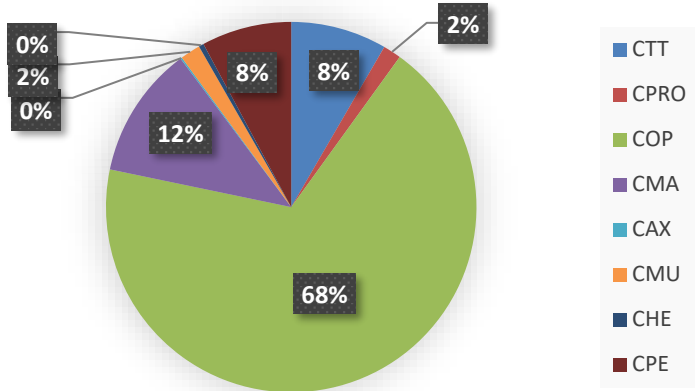


Figura 5.11 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 4 (Fuente: elaboración propia)

Por otra parte, en el caso de la ruta alterna 5 las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 51% de las consecuencias totales, seguidas por un 21% correspondiente a las tarifas derivadas por peaje de los subtramos que conforman a esta alternativa. Asimismo, las afectaciones al medio ambiente representan un 13% de las consecuencias totales esperadas, si se elige esta alternativa, mientras que el 6% corresponde a decesos en carreteras seguido por el 4% correspondiente al aumento de tiempos de recorrido (Ver Figura 5.12).

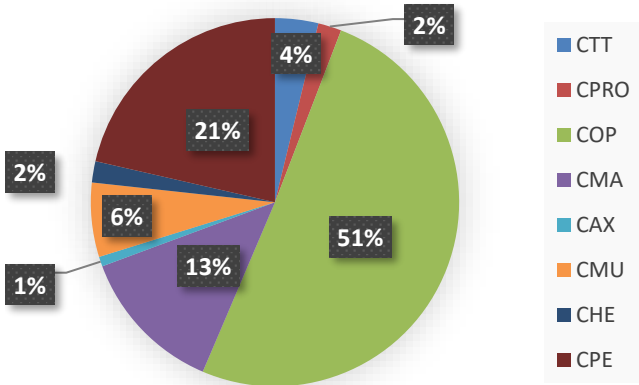


Figura 5.12 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5 (Fuente: elaboración propia)

5.1.3 Resultados para el escenario de falla III

En este apartado se genera la interrupción del subtramo 4: Acambay-Palmillas (57), el cual forma parte de la ruta principal, además de las rutas alternas 2 y 4, por lo que estas tampoco estarán disponibles para los usuarios. De esta manera, los usuarios solamente podrán elegir

entre las rutas alternas 1, 3 y 5 como se muestra en la Tabla 5.3. Como es de esperarse, la variación en las condiciones de las rutas disponibles con respecto a la ruta principal, tendrá efectos en los vehículos y usuarios que diariamente realizan el recorrido Toluca-Palmillas, ocasionando consecuencias en su mayoría adversas. Las consecuencias esperadas por la utilización de las rutas alternas 1, 3 y 5 al quedar interrumpido el subtramo 4, se observan a continuación:

Consecuencias esperadas para el escenario III (\$/s)						
Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	1.935	Ruta inválida	1.913	Ruta inválida	0.599
MODELO II	CPRO	0.323	Ruta inválida	0.323	Ruta inválida	0.323
MODELO III	COP	15.349	Ruta inválida	14.767	Ruta inválida	7.977
MODELO IV	CMA	3.861	Ruta inválida	3.861	Ruta inválida	2.041
MODELO V	CAX	0.159	Ruta inválida	0.156	Ruta inválida	0.135
MODELO VI	CMU	0.889	Ruta inválida	0.902	Ruta inválida	1.028
MODELO VII	CHE	0.254	Ruta inválida	0.253	Ruta inválida	0.294
MODELO VIII	CPE	11.016	Ruta inválida	12.597	Ruta inválida	3.379
TOTAL	(\$/s)	33.787	Ruta inválida	34.773	Ruta inválida	15.777

Tabla 5.3 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 1, 3 y 5 dada la interrupción del subtramo 4 (Fuente: elaboración propia)

En cuanto a las tres rutas disponibles, es decir, las rutas alternas 1, 3 y 5 respectivamente, se puede observar que la ruta alterna que genera menores consecuencias es la ruta alterna 5, compuesta por los subtramos Toluca-Jilotepec (11) y Jilotepec-Palmillas (57D), donde se espera que el paso de los 4,721 vehículos que recorren diariamente el trayecto Toluca-Palmillas, generen costos de aproximadamente \$15.77/s dado que el subtramo interrumpido, es decir, el subtramo 1 es indispensable para la ruta principal, siendo este el de mayor longitud y de mejores especificaciones. Aun así, los vehículos podrán elegir además de la ruta alterna 5, las rutas 1 y 3, sin embargo, en ambas se esperan consecuencias equivalentes al doble de aquellas derivadas del uso de la ruta 5. Esta comparación se puede ver en la Figura 5.13.

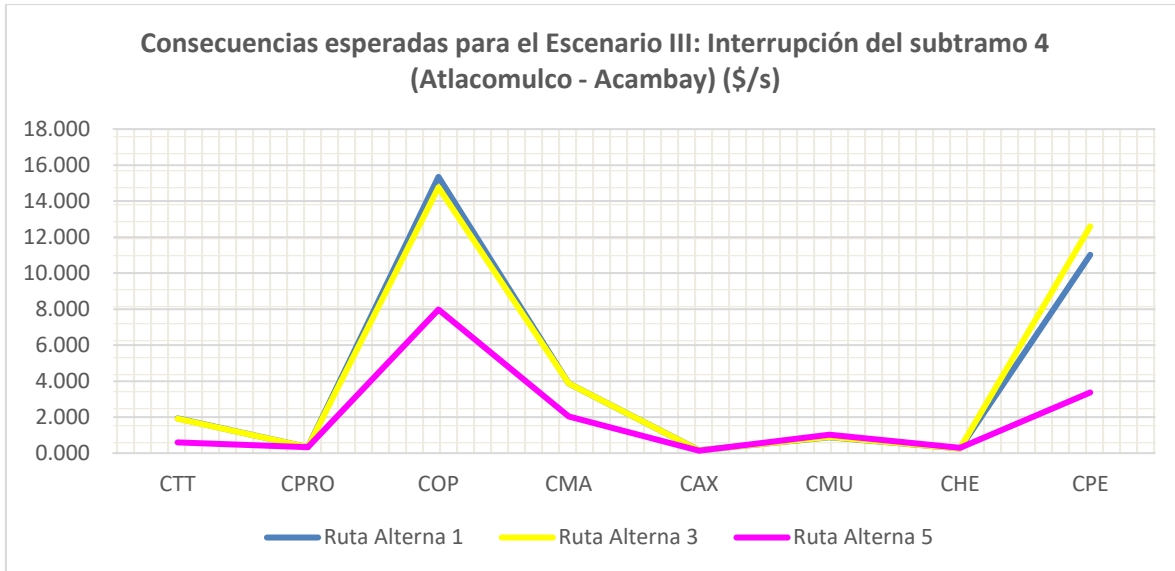


Figura 5.13 Consecuencias esperadas para las rutas alternas 1, 3 y 5 dada la interrupción del subtramo 4 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede ver en la figura anterior, las consecuencias ligadas a la productividad de los usuarios así como las ocasionadas por pérdidas materiales, decesos y heridos son similares para las tres rutas disponibles en este escenario.

Sin embargo, para el caso de las rutas alternas 1 y 3, se observa un incremento considerable en las consecuencias esperadas referentes a los costos de operación base de los vehículos así como los derivados por peaje, lo que ocasiona que la ruta alterna 5 se posicione como la mejor opción a elegir.

Para el caso de la ruta alterna 1, se puede observar que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 45% de las consecuencias totales, seguidas por un 33% correspondiente a los costos derivados por peaje en los subtramos de cuota que conforman a esta ruta alterna.

También se identifica que el 11% de las consecuencias totales es ocasionado por las afectaciones al medio ambiente mientras que el aumento en los tiempos de recorrido genera el 6% de las consecuencias esperadas (Ver Figura 5.14).

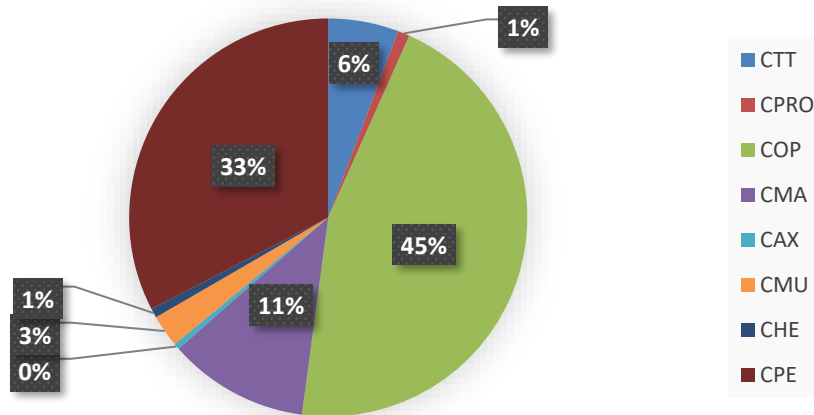


Figura 5.14 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 1 (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, en la ruta alterna 3, es posible observar que las consecuencias derivadas por el peaje y las ocasionadas por los costos operacionales de los vehículos tienen un peso similar, con el 36% y 42% respectivamente. Además, se puede notar que el 11% de las consecuencias esperadas corresponden a afectaciones al medio ambiente, mientras que el costo esperado por el aumento del tiempo en el recorrido por esta alternativa equivale al 6% del total de las consecuencias (Ver Figura 5.15).

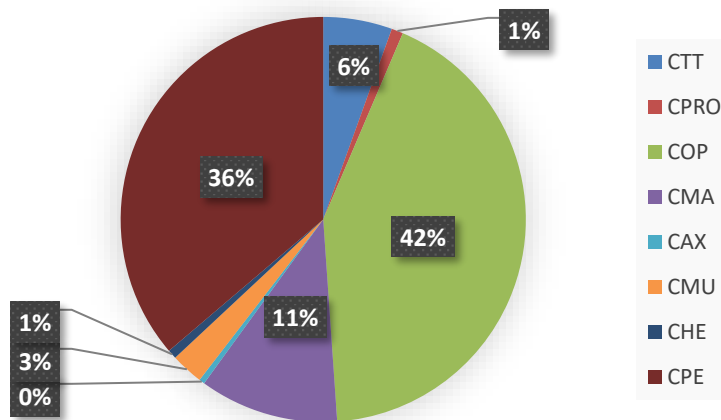


Figura 5.15 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 3 (Fuente: elaboración propia)

En el caso de la ruta alterna 5, se distingue que las consecuencias que tienen un mayor peso son aquellas ocasionadas por el costo operacional de los vehículos, representando un 51% de las consecuencias totales, seguidas por un 21% correspondiente a las tarifas derivadas por peaje de los subtramos que conforman a esta alternativa. Al mismo tiempo, las afectaciones al medio ambiente representan un 13% de las consecuencias totales esperadas

si se elige esta alternativa, mientras que el 6% corresponde a decesos en carreteras seguido por el 4% correspondiente al aumento de tiempos de recorrido (Ver Figura 5.16).

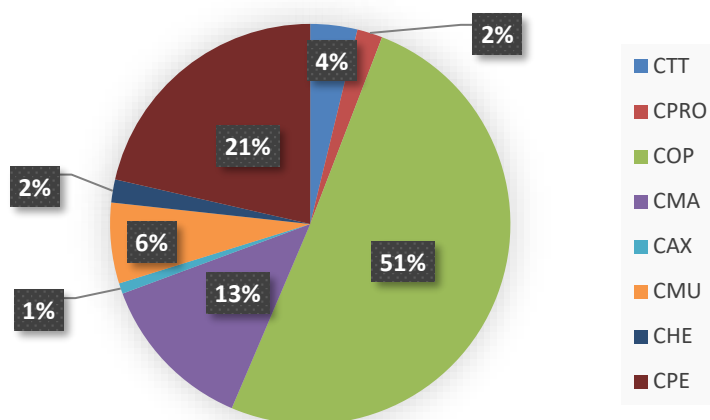


Figura 5.16 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5 (Fuente: elaboración propia)

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados anteriores y con el objetivo de lograr un mayor entendimiento sobre el comportamiento de la red, se puede realizar una comparación entre los costos esperados para las diferentes consecuencias generadas en cada modelo y aquellos esperados en la ruta principal.

En otras palabras, conociendo el costo generado en la ruta principal y el costo esperado al utilizar cualquiera de sus alternativas, la razón entre estos indicará en qué proporción aumentan o disminuyen los costos esperados al hacer uso de las rutas alternas disponibles. El procedimiento se puede consultar en el apartado 12 del Apéndice K del cual se desprende el siguiente análisis para cada uno de los escenarios propuestos.

Si bien, ya se conocen las mejores alternativas para cada uno de los tres escenarios de falla propuestos, se puede realizar un análisis para determinar cuáles de los costos cuantificados se ven mayormente afectados al utilizar cualquiera de las rutas alternas en comparación a aquellos esperados durante el recorrido cotidiano que realizan diariamente los vehículos que conforman al TDPA_{ef} haciendo uso de la ruta principal.

La comparación entre los costos esperados al utilizar las rutas alternas en lugar de la ruta principal se muestra en la Tabla 5.4.

Relación Ci/CRP (%)						
Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	124.79%	99.72%	124.51%	136.69%	107.67%
MODELO II	CPRO	103.00%	100.00%	103.00%	105.00%	103.00%
MODELO III	COP	128.36%	98.93%	127.28%	143.09%	114.74%
MODELO IV	CMA	142.74%	100.00%	142.74%	143.64%	122.59%
MODELO V	CAX	251.61%	97.03%	248.64%	144.35%	229.03%
MODELO VI	CMU	385.76%	103.99%	389.76%	293.19%	430.26%
MODELO VII	CHE	430.13%	98.99%	429.13%	293.59%	481.90%
MODELO VIII	CPE	322.39%	131.93%	354.32%	154.17%	168.22%

Tabla 5.4 Comparación entre los costos generados en las rutas alternas disponibles y la ruta principal (Fuente: elaboración propia)

Como es posible ver en la tabla anterior, la razón de los costos esperados para cada modelo y el costo cuantificado para la ruta principal, proporcionan una manera clara para entender el efecto de la utilización de una ruta alterna al quedar interrumpida la ruta principal.

De esta manera, mientras que los porcentajes superiores a 100% indican un aumento en los costos esperados, los porcentajes menores a este se dan cuando se presenta una disminución en los costos esperados para alguno de los modelos propuestos, lo anterior a causa de que como se muestra en las secciones 5.1.1 a 5.13; uno o más subtramos de las rutas alternas presentan mejores especificaciones técnicas comparados con aquellos que conforman a la ruta principal.

Así pues, tomando como un valor unitario el valor de las consecuencias esperadas en la ruta principal, se puede generar una matriz de gasto y ahorro para mostrar por tipo de consecuencia, en donde se esperan justamente menores o mayores costos en función de los costos esperados en la ruta principal y aquellos cuantificados para cada una de las rutas alternas agrupados por tipo de consecuencia como se muestra en la Tabla 5.5.

Matriz de Gasto/Ahorro						
Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	-24.79%	0.28%	-24.51%	-36.69%	-7.67%
MODELO II	CPR	-3.00%	0.00%	-3.00%	-5.00%	-3.00%
MODELO III	COP	-28.36%	1.07%	-27.28%	-43.09%	-14.74%
MODELO IV	CMA	-42.74%	0.00%	-42.74%	-43.64%	-22.59%
MODELO V	CAX	-151.61%	2.97%	-148.64%	-44.35%	-129.03%
MODELO VI	CMU	-285.76%	-3.99%	-289.76%	-193.19%	-330.26%
MODELO VII	CHE	-330.13%	1.01%	-329.13%	-193.59%	-381.90%
MODELO VIII	CPE	-222.39%	-31.93%	-254.32%	-54.17%	-68.22%

Tabla 5.5 Matriz de ahorro y gasto para cada una de las cinco rutas alternas disponibles, donde los números negativos implican un gasto mientras los positivos implican un ahorro en los costos estimados (Fuente: elaboración propia)

Si bien, ya se conoce que para los escenarios de falla I y III, la mejor ruta disponible es la ruta alterna 5 costando un total de \$15.78/s, a partir de la interpretación de la matriz gasto/ahorro, se puede inferir que, aunque esta ruta es la mejor opción, se espera que tanto las consecuencias socioeconómicas y operacionales así como aquellas ocasionadas al medio ambiente, además de las derivadas de pérdidas materiales, heridos y muertes en accidentes, serán consecuencias adversas como se muestra en la Tabla 5.5.

En otras palabras, la totalidad de los ocho modelos de consecuencias, generan números negativos, implicando gastos adversos para los usuarios. De manera particular, si se dan cualquiera de los escenarios de falla I o III, para los que se recomienda la utilización de la ruta alterna 5, se esperarán por lo menos pérdidas ocasionadas equivalentes al 3.00% de la productividad de los usuarios afectados, siendo este parámetro el que presenta una menor variación, seguido de un incremento en los costos derivados por el aumento del tiempo de recorrido equivalente al 7.67% del esperado al utilizar la ruta principal.

Asimismo, se observa que el mayor incremento en los costos esperados al utilizar la ruta alterna 5, dada la ocurrencia de cualquiera de estos dos escenarios, será el ocasionado tanto por accidentes con decesos como por aquellos donde se presenten heridos, donde se esperan un número de percances casi cuatro veces mayor al utilizar esta ruta alterna a comparación de aquellos esperados durante el recorrido por la ruta principal. Sin embargo, se reitera que

para el caso de estos dos modelos (C_{ax} y C_{he}), no solamente se toma en cuenta el efecto del $TDP A_{ef}$, sino el de su redireccionamiento por los subtramos de la ruta alterna 5 ya que, como se mencionó en el capítulo 4, se presume que el redireccionamiento de estos vehículos hacia los subtramos de esta ruta alterna tendrá incidencia en el número de accidentes generados durante el lapso de tiempo en el que estará interrumpida la ruta principal.

Por otro lado, para el escenario de falla II, donde se recomienda utilizar la ruta alternativa 2 pues es la que genera menores consecuencias con un monto que asciende a los \$0.99/s, se puede inferir de la matriz de gasto/ahorro que esta ruta alterna no solamente presenta la cifra más baja en comparación con las otras cuatro rutas alternas disponibles sino que su utilización representa un ahorro en seis de los ocho modelos de consecuencias propuestos, es decir, al estar bajo el supuesto del escenario II y utilizar la ruta alterna 2 se espera que solamente se presenten incrementos en las consecuencias derivadas de accidentes con decesos equivalentes al 3.99% comparados con aquellos presentados en la ruta principal, así como un incremento del 31.93% en los costos ocasionados por las tarifas de peaje por cubrir en los subtramos que componen a esta ruta alterna.

De esta manera, aunque se presentan ahorros derivados por un menor tiempo de recorrido, así como una disminución en los costos de operación vehicular, además de menores pérdidas materiales y accidentes con heridos al utilizar esta ruta alterna, estos ahorros se ven principalmente superados por los gastos derivados de los costos elevados de peaje impuestos en la ruta seleccionada.

5.2.1 Análisis probabilístico

Hasta el momento, los valores de las variables utilizadas en el modelo han sido ingresados de manera determinística a partir de indicadores vigentes de cada uno de los datos necesarios para poder estimar las diferentes consecuencias esperadas en cada uno de los apartados anteriores, sin embargo, si se conoce el comportamiento de una o más variables de las que depende el Modelo General de Consecuencias, esta información puede ser utilizada para calibrar el modelo y lograr una mejor aproximación de los resultados que permita incluso predecir el comportamiento de la red propuesta. Una vez identificadas estas variables, así como su comportamiento, se pueden implementar diversas técnicas o modelos probabilísticos existentes que permitan representar este conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales.

Para el caso del presente análisis se utiliza el comportamiento conocido de tres variables: el valor por tiempo de trabajo (SHP), el salario mínimo de la región geográfica en estudio (SM) y la variación del peso contra el dólar (TC), esto bajo el supuesto de que las variables antes mencionadas son representativas para el modelo y además que se tiene registro del comportamiento de estas a lo largo de un periodo determinado de tiempo lo que permite asociarlo a una distribución probabilística. De manera específica, las tres variables propuestas se pueden definir por los siguientes parámetros probabilísticos:

Variable	Distribución propuesta	X1	X2	X3	X4	R
SHP	BETA	0.50074	0.57054	24.14	43.19	0.92117
SM	LOGNORMAL	3.8737	0.32301			0.94962
TC	NORMAL	17.743	1.646			0.91281

Tabla 5.6 Variables aleatorias consideradas para el modelo (Fuente: elaboración propia)

El contenido de la tabla anterior se obtuvo a partir de información recopilada en boletines informativos del IMT para el caso del SHP donde se muestran datos desde el 2009 al 2017 (**Torres & Hernández, 2009**) en tanto que para los datos referentes al salario mínimo y la variación del peso mexicano contra el dólar se utilizó información libre para su consulta en las páginas oficiales de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos (CONASAMI) y el Banco de México (BANXICO) respectivamente, para los años de 1996 a 2017.

Posteriormente se hizo uso del *Software EasyFit* para determinar la distribución probabilística que mejor representa el comportamiento para cada una de las variables en función de su coeficiente de correlación y cuyo procedimiento se puede consultar en el Apéndice L.

5.2.1.1 Implementación de una red bayesiana

Para fines de la presente investigación se consideró la utilización de una red bayesiana para la interpretación de los resultados así como su posterior análisis, esto en función de que esta técnica tiene múltiples aplicaciones por lo que resulta versátil y de utilidad para el caso de estudio propuesto, debido a que esta técnica puede aplicarse no solamente para fines de clasificación sino además para la predicción o diagnóstico de un fenómeno.

Como es bien sabido, una red bayesiana es un grafo acíclico compuesto por nodos los cuales representan una variable aleatoria asociada a una probabilidad condicional, además de arcos dirigidos hacia estos nodos con el objetivo de representar la dependencia condicional entre las variables que conforman el modelo (Santiesteban Rojas, 2012). En el caso de este

estudio, las variables aleatorias SHP, SM, y TC alimentan a los modelos contenidos en el MGC y, este a su vez, realiza las rutinas necesarias para determinar las consecuencias esperadas para cada escenario de falla recomendando la mejor opción disponible para cada uno, dicha relación se puede representar gráficamente como se muestra en la Figura 5.17.

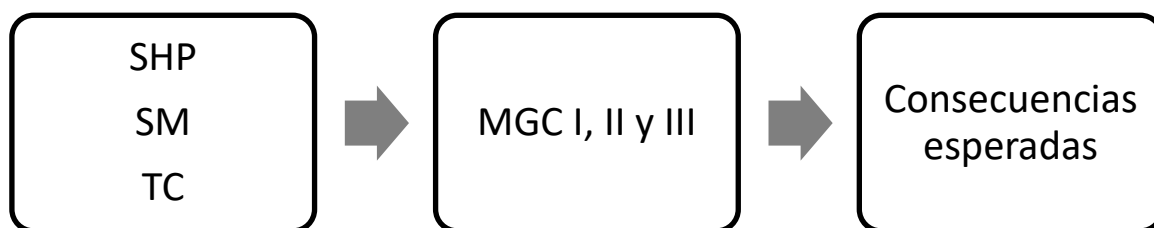


Figura 5.17 Relación gráfica entre las variables aleatorias propuestas y las consecuencias esperadas (Fuente: elaboración propia)

Tomando en cuenta las tres variables aleatorias mencionadas anteriormente, es posible representar el MGC a partir de nodos y arcos de dependencia entre estas variables además de los costos esperados para cada una de las rutas en función del escenario de falla del que se trate, siendo este el primer paso para la generación de una red bayesiana, como se muestra en la Figura 5.18.

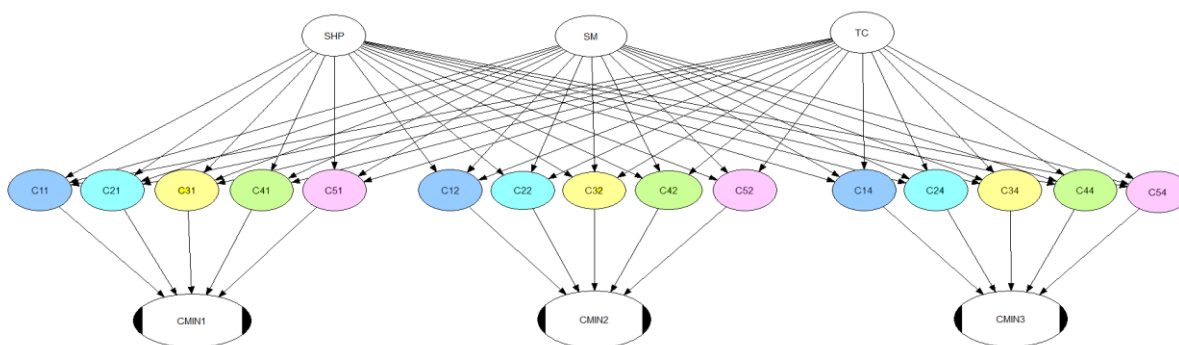


Figura 5.18 Red bayesiana propuesta para el MGC (Fuente: elaboración propia)

En la figura anterior se puede ver que los nodos correspondientes a las tres variables aleatorias SHP, SM, y TC alimentan a los nodos intermedios correspondientes a las consecuencias esperadas agrupadas por escenario de falla, mientras que la información de estos nodos determina a su vez el valor del nodo inferior, es decir, la menor consecuencia esperada por tipo de escenario y ruta alternativa utilizada. Como se puede ver en la Figura 5.18, los nodos que integran el nivel intermedio de la red están divididos en tres grupos que representan los escenarios de falla I, II y III respectivamente, asimismo, estos 15 nodos representan las consecuencias esperadas al utilizar cualquiera de las 5 rutas alternas, donde

el primer subíndice representa la ruta alterna que alimenta al nodo en cuestión, en tanto que el segundo subíndice representa el escenario de falla para este (Ej.: el primer grupo de nodos intermedio, compuesto por los nodos C11, C21, C31, C41 y C51, corresponden a las consecuencias esperadas para las rutas alternas 1, 2, 3, 4 y 5 del escenario de Falla 1).

Para la elaboración de la red bayesiana propuesta, se utilizó el *Software Uninet Academic*, donde se cargó la información correspondiente a un total de 10 mil corridas al MGC elaborado en Excel, las cuales fueron exportadas por medio de un macro cuyo código se puede consultar en el Apéndice M. Dichas corridas consistieron en la asignación de valores aleatorios a las variables SHP, SM, y TC, en función de la distribución de probabilidad propuesta para cada una en el apartado 5.2.1 (Ver Figura 5.19).

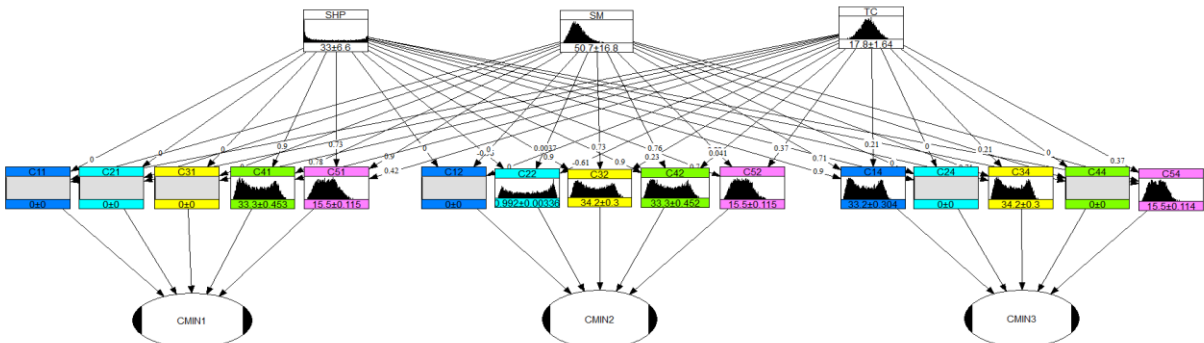


Figura 5.19 Red bayesiana propuesta para el MGC alimentada utilizando Uninet© (Fuente: elaboración propia)

Dado que el MGC se basa en la interrupción de alguno de los subtramos de la ruta principal ciertos nodos de consecuencias no estarán disponibles, como se muestra en la figura anterior, al ser representados por nodos sombreados, ya que la ruta alterna a la que hacen referencia no podrá utilizarse.

Por otro lado, el resto de los nodos, representan costos derivados de alternativas viables y se muestran con su correspondiente histograma así como su respectivo coeficiente de correlación contenido en los arcos de la red, el cual se calibra automáticamente en función de la información importada de Excel y representa la dependencia entre la consecuencia esperada y la variable aleatoria correspondiente.

De esta manera, dada la ocurrencia del escenario I donde el subtramo interrumpido es el 1, solamente las rutas alternas 4 y 5 estarán disponibles (Nodos C41 y C51) mientras que para el caso del escenario II donde la interrupción se da en el subtramo 2, la única ruta alterna no disponible será la ruta alterna 1 (Nodo C12) en tanto que para el escenario III donde el subtramo interrumpido es el 4, los usuarios solamente podrán elegir entre las rutas alternas 1, 3 y 5 (Nodos C14, C34 y C54 respectivamente).

Como es de esperarse, si se condiciona la red a la situación actual, es decir, si se le asignan a la red los valores constantes utilizados en el MGC a las variables aleatorias propuestas (SHP=43.19 SM=80.04 y TC=18.16) como se muestra en la Figura 5.20 la red arroja los valores $CMIN1 = 15.9 \pm 0.46$ correspondiente a la recomendación de utilizar la ruta 5 dado el escenario I.

De igual manera, la red muestra un $CMIN2 = 0.986 \pm 7.83e-5$ equivalente a utilizar la ruta 2 dado el escenario II mientras que en el caso de $CMIN3 = 15.9 \pm 0.08$, se observa que esta cifra corresponde a la utilización de la ruta 5 dado el escenario III. De ahí que los valores de $CMIN1$, $CMIN2$ y $CMIN3$ coinciden con las recomendaciones realizadas por el MGC en los apartados 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.3 para cada uno de los escenarios de falla propuestos.

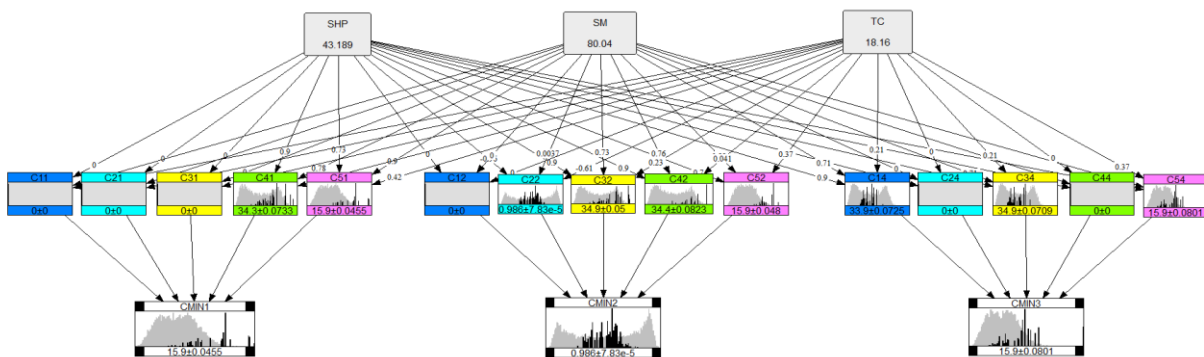


Figura 5.20 Resultados de la red bayesiana para valores condicionados de SHP, SM y TC (Fuente: elaboración propia)

Ahora bien, a partir de la utilización del *Software Uninet* es posible realizar un análisis más completo para entender la relación que se genera en cada uno de los nodos de la red en función de la dependencia que existe entre cada uno de ellos.

A partir de las matrices de coeficientes de correlación calculadas para el modelo, las cuales se pueden consultar en el Apéndice N, se obtiene que de las tres variables aleatorias propuestas la que presenta los mayores coeficientes de correlación, superando en algunos casos valores de 0.8, es la correspondiente al costo por motivo de trabajo, es decir, la variable SHP. Para lograr un mayor entendimiento de estas correlaciones se utilizó el módulo de *Unigraph*, del cual se desprenden gráficas multivariable de las Figuras 5.21 a 5.23.

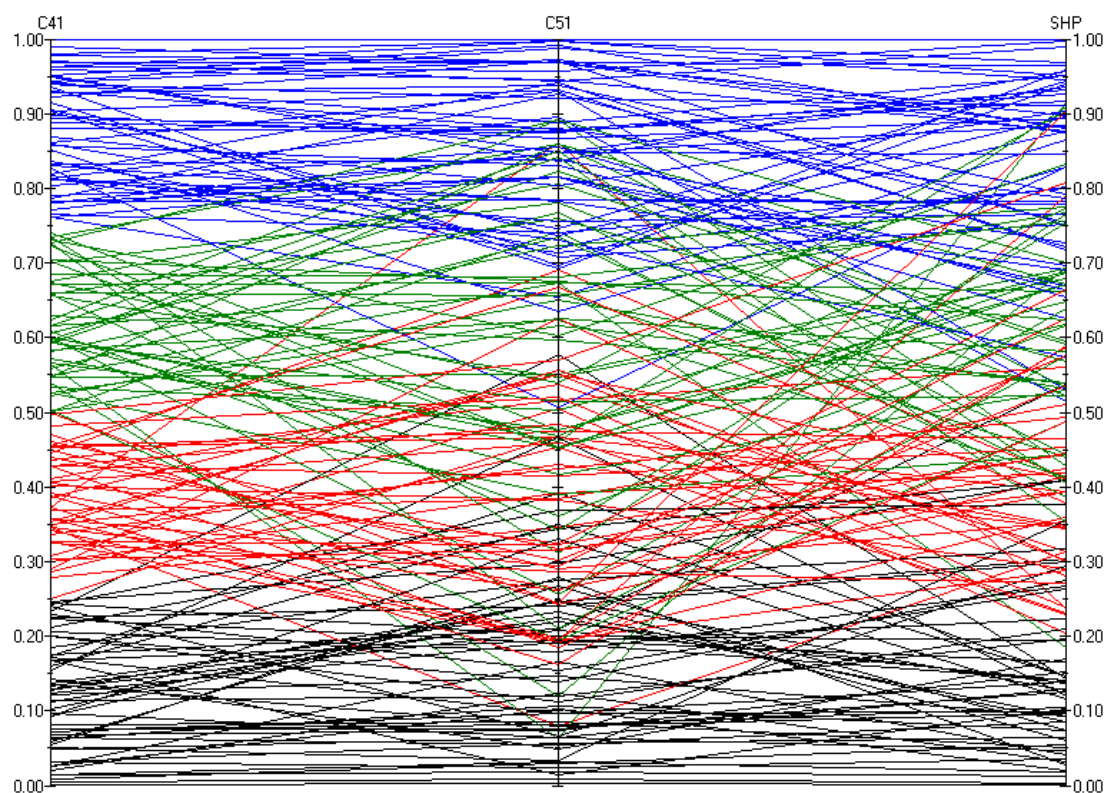


Figura 5.21 Correlación gráfica entre la variable SHP y las consecuencias de las rutas alternas 4 y 5, dado el escenario de falla I (Fuente: elaboración propia)

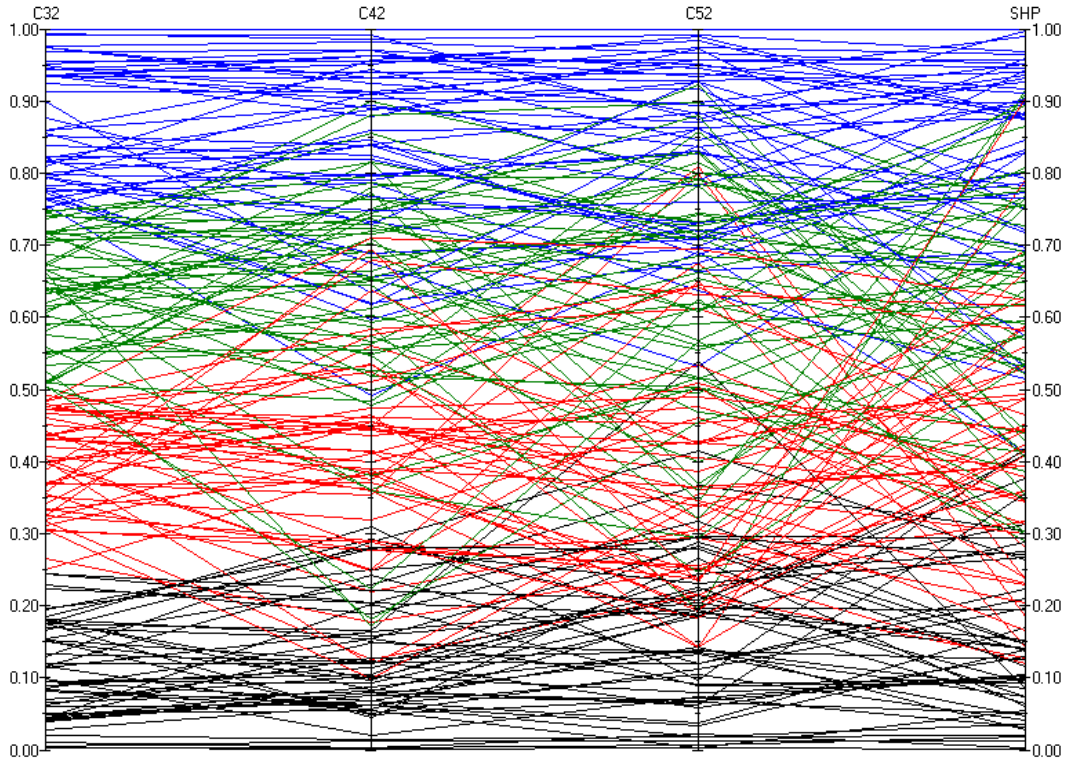


Figura 5.22 Correlación gráfica entre la variable SHP y las consecuencias de las rutas alternas 3, 4 y 5 (las más desfavorables), dado el escenario de falla II (Fuente: elaboración propia)

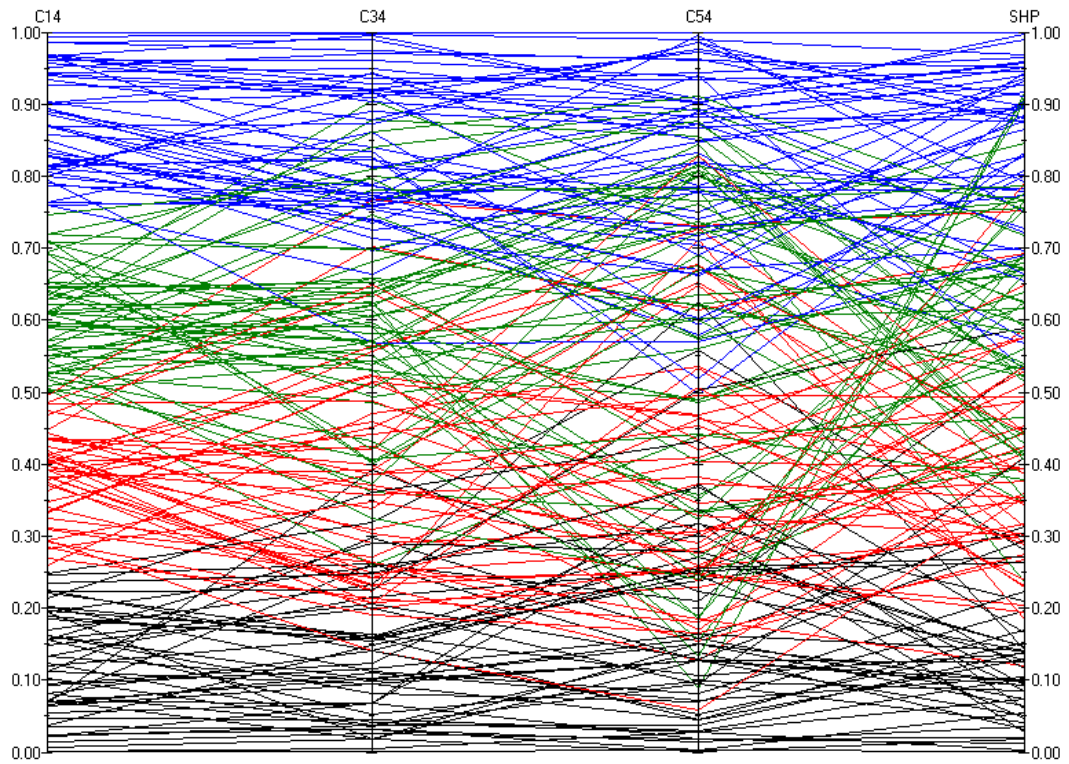


Figura 5.23 Correlación gráfica entre la variable SHP y las consecuencias de las rutas alternas 1, 3 y 5, dado el escenario de falla III (Fuente: elaboración propia)

Así pues, como se observa en las gráficas anteriores, se espera una correlación positiva entre la variable SHP y las consecuencias esperadas para cada uno de los escenarios de falla al utilizar las diferentes rutas alternas disponibles, de esta forma se puede inferir que entre mayor sea el valor del costo por motivo de trabajo de los afectados dada la ocurrencia de alguno de los escenarios de falla propuestos, así también serán mayores las consecuencias generadas por la utilización de las rutas alternas disponibles al quedar interrumpido alguno de los subtramos que integran a la ruta principal.

Por otra parte, se puede realizar un análisis de sensibilidad con otro de los módulos de *Uninet* denominado *Unisense*, del cual se pueden obtener las ecuaciones de segundo grado para la estimación de las consecuencias para cada ruta alterna disponible y escenario de falla de que se trate, en función de las variables aleatorias SHP, SM, y TC, como se muestra en las Tablas 5.7, 5.8 y 5.9 respectivamente.

Escenario	Ruta alterna disponible	$E(C_i SHP)$
1	4	$-.0001SHP^2 + 0.0671SHP + 31.1657$
	5	$-0.0000SHP^2 + 0.0119SHP + 15.1120$
2	2	$-0.0000SHP^2 - 0.00005SHP + 1.0077$
	3	$0.0001SHP^2 + 0.0389SHP + 32.8863$
	4	$0.0000SHP^2 + 0.0601SHP + 31.2788$
3	5	$-0.0000SHP^2 + 0.0093SHP + 15.1521$
	1	$-0.0000SHP^2 + 0.0427SHP + 31.8255$
	3	$-0.0000SHP^2 + 0.0422SHP + 32.8350$
	5	$0.0000SHP^2 + 0.0107SHP + 15.1316$

Tabla 5.7 Consecuencias esperadas para las rutas y escenarios disponibles dado el valor de SHP (Fuente: elaboración propia)

Escenario	Ruta alterna disponible	$E(C_i S_M)$
1	4	$-0.0001S_M^2 + 0.016S_M + 32.6216$
	5	$-0.0000S_M^2 + 0.073S_M + 15.2229$
2	2	$-0.0000S_M^2 + 0.0000S_M + 0.9918$
	3	$-0.0000S_M^2 + 0.0099S_M + 33.8071$
	4	$-0.0001S_M^2 + 0.0162S_M + 32.6376$
3	5	$-0.0000S_M^2 + 0.0068S_M + 15.2371$
	1	$-0.0000S_M^2 + 0.0094S_M + 32.8334$
	3	$-0.0000S_M^2 + 0.0097S_M + 33.8179$
	5	$-0.0000S_M^2 + 0.0070S_M + 15.2320$

Tabla 5.8 Consecuencias esperadas para las rutas y escenarios disponibles dado el valor de SM (Fuente: elaboración propia)

Escenario	Ruta alterna disponible	$E(C_i T_C)$
1	4	$0.0008T_C^2 - 0.025 T_C + 33.4323$
	5	$0.0002T_C^2 - 0.0010 T_C + 15.4291$
2	2	$-0.0000T_C^2 - 0.0002 T_C + 0.9968$
	3	$0.0004T_C^2 - 0.0046 T_C + 34.1377$
	4	$0.0008T_C^2 - 0.0246 T_C + 33.4657$
	5	$0.0002T_C^2 - 0.0002 T_C + 15.4457$
3	1	$0.0005T_C^2 - 0.0057 T_C + 33.1608$
	3	$0.0004T_C^2 - 0.024 T_C + 34.1282$
	5	$0.0002T_C^2 + 0.0008 T_C + 15.4331$

Tabla 5.9 Consecuencias esperadas para las rutas y escenarios disponibles dado el valor de TC (Fuente: elaboración propia)

Por consiguiente, si se condicionan las ecuaciones de segundo grado con los valores de diseño se obtienen entonces resultados cercanos a los obtenidos en los apartados 5.1.1, 5.1.2, y 5.1.3 respectivamente, de esta manera la obtención de las ecuaciones antes citadas resulta en una herramienta de gran utilidad para estimar de manera simplificada las consecuencias esperadas para el modelo de red planteado. De manera ilustrativa, dada la ocurrencia del escenario I y conociendo el valor de SHP=43.19, al utilizar las ecuaciones de la Tabla 5.7, se podrán conocer entonces las consecuencias por la utilización de las rutas disponibles 4 y 5, dando como resultado valores de \$33.88/s y \$15.66/s para cada una de las rutas respectivamente.

De nueva cuenta se puede observar, que la mejor alternativa para el escenario I, es elegir la ruta alterna 5 que arroja consecuencias equivalentes a los \$15.66/s, cifra muy cercana a los \$15.77/s calculados en la sección 6.1.1.

5.3 CONCLUSIONES

Para denotar la importancia del tramo carretero Toluca-Palmillas, el cual es ocupado principalmente por vehículos de carga, es importante mencionar que, de acuerdo a la clasificación vigente de la SCT, este tramo forma parte del corredor México-Nogales, el cual recorre gran parte de México e inicia en la Ciudad de México y termina en Nogales, Sonora, frontera con los Estados Unidos. A lo largo del desarrollo del trabajo doctoral, se logró realizar una propuesta metodológica efectiva para la cuantificación de las consecuencias de la interrupción de una red carretera a partir del establecimiento de una ruta principal y de las posibles rutas alternas disponibles que permitan cumplir con el recorrido del trayecto afectado.

Las diferencias en las distancias, especificaciones y condiciones físicas de las rutas alternas en comparación con la ruta principal, generan una variación en los costos esperados por la utilización de cada una de estas en contraste con aquellas derivadas del trayecto cotidiano de los vehículos afectados. Esto se traduce en una consecuencia adversa que puede servir como parámetro para elegir cuál de las alternativas disponibles es la mejor opción dada la interrupción parcial o total de la ruta principal.

Entonces, para lograr un mejor entendimiento respecto a las consecuencias de la utilización de una ruta alterna al existir una interrupción en la ruta principal, sus efectos se pueden clasificar en consecuencias socioeconómicas y operacionales. Además, se tienen las afectaciones al medio ambiente así como aquellas derivadas de accidentes y trayectos sujetos a peaje.

En cuanto a las consecuencias socioeconómicas, se logró estimar una cuantificación de sus efectos a partir del valor del tiempo por motivo de trabajo de los afectados ya que la utilización de rutas alternas genera diferencias en los tiempos de traslado que generalmente son superiores a los tiempos esperados al utilizar la ruta principal. Asimismo en este punto, es importante mencionar que el aumento en los tiempos de traslado también genera consecuencias negativas en el rendimiento de los usuarios a lo largo de su jornada laboral ya que, al estar expuestos a tiempos de recorrido mayores a los cotidianos, su rendimiento no será el mismo a lo largo del día.

En el presente trabajo se logró realizar una estimación para dichos efectos a partir de la variación de las distancias de recorrido entre las rutas disponibles y la ruta principal así como la implementación de un índice de productividad de los afectados. Este dependerá principalmente de la diferencia de las distancias entre la ruta principal y la ruta alterna elegida, permitiendo realizar una cuantificación del efecto en el rendimiento de los usuarios durante su jornada laboral al haber sido interrumpido su trayecto al trabajo.

En efecto, una vez interrumpida la ruta principal, el paso de los vehículos por las rutas alternas disponibles, las cuales cuentan con diferentes especificaciones técnicas y físicas, genera afectaciones en los vehículos; estas van desde un aumento en el consumo de combustible, desgaste en llantas, utilización de lubricantes y diversos insumos, entre otros. Si bien, existen modelos establecidos para la determinación de este efecto en los costos operacionales de los cuales se apoya la presente investigación es importante mencionar que

aquí se analiza justamente la variación entre los costos operacionales esperados en la ruta principal y las rutas alternas disponibles, con el objetivo de determinar cuál de estas es la mejor opción ya que su aplicación puede llevar a generar ahorros representativos.

Para el análisis de este punto en particular, aunque intuitivamente podría suponerse que la ruta alterna con la menor distancia es la más recomendable puesto que genera costos operacionales menores, es indispensable conocer el efecto de los otros modelos de consecuencias propuestos en el presente trabajo; existen diversos factores como las condiciones actuales del camino, el alto índice de accidentes o un peaje elevado en la ruta seleccionada que pueden generar un impacto mayor en el tomador de decisiones.

En lo que respecta a las afectaciones al medio ambiente, si bien ya se mencionó que en México no existe una metodología clara o establecida para la cuantificación del efecto de las emisiones de CO₂ al medio ambiente y que la información en los inventarios ambientales disponibles es limitada, se hace hincapié en que el presente trabajo propone un modelo sencillo y de fácil utilización para su cuantificación en función de la cantidad y clasificación de los vehículos afectados. De esta manera, se logra una aproximación de la cantidad de CO₂ emitido en exceso a la atmósfera, al estar expuestos los vehículos a distancias de recorrido mayores. Finalmente, se logra de manera efectiva llevar estas emisiones a términos monetarios para poder realizar una comparativa entre las rutas alternas disponibles que servirá de apoyo para elegir una vez interrumpida la ruta principal. De manera particular, para el caso de estudio el aforo vehicular consta en su mayoría de vehículos tipo A, que son los responsables de la mayor parte de las emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Por otra parte, llega a ser evidente que la utilización de vías alternas y la variación en su geometría y especificaciones técnicas así como su estado físico actual, propiciará, entre otros efectos, la ocurrencia de accidentes donde además de las pérdidas materiales esperadas dentro de estos percances podrán surgir heridos o incluso pérdidas humanas. Es indispensable conocer lo que esto implica ya que elegir una ruta alterna de difícil acceso o de bajas especificaciones podría generar consecuencias mayores.

Asimismo, dada la interrupción del servicio de la ruta principal, algunas de las alternativas disponibles contarán con tramos sujetos a peaje. En esta investigación, se construyó un modelo básico donde se le hace saber al lector de forma concreta el costo que implica elegir una ruta alterna por sobre otras, en función de los tramos con peaje que la

conforman. Sin embargo, este modelo es el que presenta las consecuencias adversas más altas, es decir, desviar el aforo vehicular afectado por una ruta que involucra peaje puede provocar costos esperados mayores al del resto de los modelos. Por lo que la utilización del modelo puede ayudar al tomador de decisiones a descartar rápidamente algunas de las rutas alternas disponibles, si es que este fuera el caso.

Como resultado del trabajo se tiene una metodología eficaz que permite estimar las consecuencias esperadas de la interrupción total o parcial de una ruta carretera, a través del establecimiento de una red compuesta por una ruta principal integrada por los tramos que conforman el trayecto cotidiano de los usuarios así como la conformación de las rutas alternas que estarán disponibles dada la interrupción de uno o más tramos de los que se compone la ruta principal. Por lo tanto, el lector puede determinar fácilmente la mejor opción a elegir y de esta manera canalizar a los afectados por la ruta que implique las menores consecuencias en función de las prioridades del tomador de decisiones.

Para el caso de estudio, es decir, el tramo Toluca-Palmillas, el cual se compone por tres subtramos de interés, en el presente trabajo se proponen cinco rutas alternas, las cuales estarán disponibles en función del tramo interrumpido de la ruta principal. Entonces, considerando cada uno de los modelos de consecuencias desarrollados en la presente investigación, se concluye lo siguiente:

Si el subtramo interrumpido es el Toluca -Atlacomulco (55D), es decir, bajo el supuesto del escenario de falla 1, se tendrán disponibles únicamente las rutas alternas 4 y 5. De estas dos opciones, se recomienda la utilización de la ruta alterna 5 ya que desviar a los vehículos afectados por esta ruta resulta equivalente a esperar las menores consecuencias derivadas, que ascienden a \$15.77 por segundo.

Es importante mencionar que esta cifra incluye el efecto total del TDPA del proyecto. En otras palabras, este sería el incremento esperado en los costos generados por la totalidad de los vehículos afectados durante el tiempo en el que permanezca interrumpida la ruta principal.

Por otro lado, si el subtramo interrumpido es el Atlacomulco-Acambay (57), es decir, al encontrarnos con el escenario de falla II, se recomienda utilizar la ruta alternativa 2 pues es la que genera menores consecuencias con un monto que asciende a los \$0.99/s, ya que esta ruta alterna no solamente presenta la cifra más baja en comparación con las otras cuatro rutas

alternas disponibles, sino que su utilización representa un ahorro en seis de los ocho modelos de consecuencias propuestos.

Finalmente, si el subtramo interrumpido es el subtramo Atlacomulco-Acambay (57), bajo el supuesto del escenario de falla III, nuevamente se recomienda utilizar la ruta alterna 5, pues esta resulta ser la ruta donde se esperan las menores consecuencias en comparación con las otras dos alternativas disponibles.

5.4 COMENTARIOS FINALES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

El trabajo desarrollado supone un avance significativo en el estudio de las redes carreteras y los costos generados tanto por vehículos y usuarios al utilizar una ruta específica para llegar a su destino. Así pues, la presente investigación aborda las consecuencias esperadas de la utilización de una ruta alterna al quedar interrumpida la ruta principal, ya que este campo de estudio es limitado y resulta complejo aplicar algunas de las metodologías existentes al contexto nacional. Sin embargo, aun cuando el modelo presenta una propuesta completa para la determinación de estas consecuencias, es necesario profundizar en algunos aspectos de mejora como los que se mencionan a continuación:

- *Muestreo en campo:* Es recomendable que para la obtención de resultados más precisos se realicen mediciones en campo de algunas de las variables utilizadas en los modelos propuestos, como es el caso de la velocidad promedio de los vehículos, aforos vehiculares de los tramos involucrados, entre otros. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en la presente investigación se utilizaron datos históricos para predecir el comportamiento de algunas de estas variables ya que la realización de mediciones en campo implica altos costos.
- *Actualización de parámetros:* La información tomada como insumo para los modelos del presente trabajo fue recopilada del 2016 al 2018 por lo que es recomendable que para replicar la metodología se utilicen datos vigentes que se pueden obtener de las publicaciones actualizadas de distintos organismos como lo son la SCT, IMT, SEMARNAT y CONASAMI, entre otros.

- *Ampliación de modelo:* En la presente investigación, el modelo propuesto soporta una red carretera de hasta 7 subtramos, de los cuales se pueden conformar una red principal y un máximo de 5 rutas alternas integradas cada una por cuatro nodos. Sin embargo, esta metodología puede ser aplicada a redes más complejas siguiendo el mismo procedimiento aquí desarrollado.
- *Aumento de variables aleatorias:* En el apartado de análisis probabilístico se analiza únicamente el comportamiento de tres variables aleatorias, las cuales son SHP, Smin y Tc, por tanto se analizan los efectos que estas tienen sobre las consecuencias esperadas. Sin embargo, si se cuenta con los datos estadísticos de otras variables que intervienen en los modelos propuestos y se conoce su comportamiento, es posible entonces actualizar el modelo y calibrarlo para determinar las relaciones de estas nuevas variables con las consecuencias esperadas.

Finalmente, los objetivos establecidos al principio de la investigación se han alcanzado. Se espera que esta tesis resulte benéfica para las instituciones y personas interesadas en el tema y que motive el desarrollo de futuros estudios en este campo del conocimiento.

Referencias

- Arriaga Patiño, M. C., Garnica Anguas, P., & Rico Rodríguez, A. (1998). *Índice internacional de la rugosidad en la red carretera de México*. Obtenido de Publicación Técnica No. 108:
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>
- Arroyo Osorno, J. A., Torres Vargas, G., González García, J. A., & Hernández García, S. (2016). *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2016*. Obtenido de Publicación Técnica IMT No. 471:
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2010). *Análisis de la movilidad urbana; Espacio, medio ambiente y equidad*. Obtenido de
https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/414/An%C3%A1lisis_de_la_movilidad_urbana._Espacio%2C_medio_ambiente_y_equidad.pdf?sequence=7&isAllowed=y
- Bayraktar, M. E., & Hastak, M. (2009). *Bayesian Belief Network Model for Decision Making in Highway Maintenance: Case Studies*. Obtenido de ASCE Library:
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000111](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000111)
- Becerril, J. (3 de 30 de 2018). *Por inundación cierran la carretera México-Toluca*. Obtenido de Milenio: http://www.milenio.com/df/cierre-carretera-mexico-toluca-inundacion-granizo-cdmx-edomex-policia-federal_0_1142886151.html
- Birh, S. (2011). El factor humano y las reglas en el diseño de carreteras. *Vías terrestres*, 53.
- Cal y Mayor R., R., & Cárdenas G., J. (2007). Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. En J. C. Rafael Gil y Mayor R., *Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones*. (Octava ed., pág. 107). México: Afaomega.
- CANACAR. (2016). *Ejes carreteros de México*. Obtenido de <https://canacar.com.mx/>
- Castelán Sayago, E. (2008). *Manual de Carreteras*. Obtenido de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-de-carreteras.pdf>
- CENAPRED. (2016). *Historia y clasificación de los fenómenos socio-organizacionales*. Obtenido de <http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/FenomenoAntrop.pdf>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (agosto de 2016). *Historia y clasificación de los fenómenos*. Obtenido de CENAPRED:
<http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/FenomenoAntrop.pdf>
- Columbia University Press. (2012). *The Columbia Electronic Encyclopedia*. Obtenido de <https://www.britannica.com/topic/Columbia-Encyclopedia>
- CONASAMI. (2017). *Nuevo Salario Mínimo General 2017*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conasami/articulos/nuevo-salario-minimo-general-88-36-pesos-diarios?idiom=es>
- Coordinación General de Protección Civil del Estado de México. (2014). *¿Qué hacer ante una emergencia?* México: Gobierno del Estado de México.
- Cruz Castillo, M., & Delgado Argote, L. A. (2000). *Deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California*. Baja California: GEOS.
- Cuanalo C., O. A., Quezada P., P., Aguilar M., A., Oliván R., A. M., & Barona D., E. (2006). *Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México*. e-Gnosis: 2006.

- Cuevas Colunga, A. C., Mayoral Grajeda, E. F., & Mendoza Díaz, A. (2011). Definición de Indicadores de Seguridad Vial en la Red Carretera Federal. *Publicación Técnica No. 345*.
- Cuevas Colunga, A. C., Mayoral Grajeda, E. F., & Mendoza Díaz, A. (2016). Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales. *Documento Técnico No. 66*.
- Cummings, F. B. (2011). El sistema carretero mexicano, pilar del desarrollo. *Vías Terrestres*, 52.
- Daniels, G., Stockton, W. R., & Hundley, R. (2000). *Estimating Road User Costs Associated with Highway Construction Projects: Simplified Method*. Obtenido de SAGE Journals: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1732-09>
- DesInventar. (2018). *Software DesInventar*. Obtenido de <https://www.desinventar.org/software.html>
- Diario Oficial de la Federación. (2009). Reglamento interior de la Secretaría de Comunicación y Transportes. México: DOF.
- Diario Oficial de la Federación. (2014). *Gaceta DOF 03/06/2014*. México: DOF.
- Dirección General de Servicios SCT. (2014). *Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014*. México: SCT.
- El Financiero. (24 de enero de 2018). *Granizada causa cierre en la autopista México-Toluca*. Obtenido de El Financiero: <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/una-granizada-cubre-de-blanco-a-la-autopista-mexico-toluca>
- El Sol de Toluca. (2017). *Arrollan a joven en la Atlacomulco - Acambay*. Obtenido de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/policiaca/arrollan-a-joven-en-la-atlacomulco-acambay-298455.html>
- El Sol de Toluca. (2018). *Bloquean manifestantes la Toluca-Tenango*. Obtenido de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/policiaca/bloquean-manifestantes-la-toluca-tenango-891899.html>
- El Sol de Toluca. (2018). *Sorprende derrumbe de rocas a automovilistas en atlacomulco*. Obtenido de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/policiaca/sorprende-derrumbe-de-rocas-a-automovilistas-en-atlacomulco-2651639.html>
- El Sol de Toluca. (2019). *Carambola en la Toluca - Atlacomulco deja un muerto y varias personas lesionadas*. Obtenido de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/policiaca/carambola-en-la-toluca-atlacomulco-deja-un-muerto-y-varias-personas-lesionadas-4275174.html>
- El Sol de Toluca. (2019). *Vuelca autobús en la Acambay - Atlacomulco*. Obtenido de <https://www.elsoldetoluca.com.mx/policiaca/vuelca-autobus-en-la-acambay-atlacomulco-3605743.html>
- El Universal. (2015). *Atienden deslave en la México-Querétaro*. Obtenido de <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/09/29/atienden-deslave-en-la-mexico-queretaro>
- El Universal. (4 de septiembre de 2017). *Reportan cierre parcial en la carretera México-Toluca por deslave*. Obtenido de El Universal: <http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/reportan-cierre-parcial-en-la-carretera-mexico-toluca-por-deslave>
- Excelsior. (16 de abril de 2014). *Remueven granizo en la autopista México-Toluca*. Obtenido de Excelsior: <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/04/16/954421>

- Excelsior. (26 de marzo de 2018). *Reportan fuerte incendio en la Chamapa-Lechería*. Obtenido de Excelsior: <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2018/03/26/1228665#imagen-3>
- Gaceta Oficial*. (29 de 04 de 2014). (P. N. 2014-2018, Productor) Recuperado el Febrero de 2018, de Diario Oficial de la Federación: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342547&fecha=29/04/2014
- Galindo, L. M. (2010). *La Economía del Cambio Climático en México*. Obtenido de http://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/2010_Economia.del.CC_galindo.pdf
- Google. (2017). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/>
- Gradilla Hernández, L. A., De la Llata Gómez, R., & González Gómez, O. (2011). Índices de vulnerabilidad de redes carreteras. Enfoques recientes y propuesta de aplicación en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII(3), 257-267.
- HM Treasury. (2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. Obtenido de https://web.archive.org/web/20061209022829/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm
- IEECC. (2014). *Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de <http://ieecc.edomex.gob.mx/sites/ieecc.edomex.gob.mx/files/files/Investigacionescientificas/EDOMEX-2010-Criterio.pdf>
- IMCO. (2018). *Programa Iniciativa Climática de México*. Obtenido de https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2018/04/ICM-IMCO-WRI-QUINTO-DESAYUNO_D.pdf
- IMT. (1991). *Publicación Técnica No. 20*. Obtenido de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt20.pdf>
- INEEC. (2013). *Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Obtenido de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf
- INEGI. (2012). Metodología para Obtener una Red Nacional de Carreteras base. *Red Nacional de Carreteras: Trabajos Conjuntos INEGI-SCT*.
- INEGI. (2014). *Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/transporte/carreteras.aspx?tema=E>
- Junta de Caminos del Estado de México. (2018). *Principales Ejes Carreteros del Estado de México*. Obtenido de <http://jcem.edomex.gob.mx/ejes-carreteros>
- Keefer, D. (1984). *Landslides caused by earthquakes*. Estados Unidos: Geological Society of America Bulletin.
- Levinson, L. M., Gillen, D., & Kanafani, A. (1996). *The social costs of intercity transportation: a review and comparison of air and highway*. Obtenido de Transport Reviews Journal: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441649808717014>
- Lombardo, Á. C. (2016). *Las carreteras en el tiempo y el espacio*. México: Secretaría de comunicación y transportes.
- María Burzaco Samper, J. M. (2007). *Carreteras y autopista, visión jurisprudencial*. Madrid: DYQUINSON.
- Márquez Díaz, L. G., & Cantillo Maza, V. M. (2011). *Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia*. Obtenido de Ingeniería y Desarrollo: <https://www.redalyc.org/pdf/852/85220757010.pdf>

- Mendoza Sánchez, J. F., López Domínguez, M. G., González Moreno, J. O., & Téllez Gutiérrez, R. (2010). *Inventario de emisiones en carreteras federales de Querétaro*. Obtenido de Publicación Técnica IMT 339: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt339.pdf>
- Mendoza Sánchez, J. F., Marcos Palomares, O. A., Mobayed Vega, N. J., & Orantes Olvera, H. (2017). *Publicación Técnica No. 498 "El clima y las carreteras en México"*. Querétaro: IMT.
- Milenio. (2017). *Hundimientos en la Toluca - Palmillas se agravan*. Obtenido de <https://www.milenio.com/estados/hundimientos-en-la-toluca-palmillas-se-agravan>
- Miller, T. R., Lestina, D. C., & Spicer, R. S. (1998). *Highway crash costs in the United States by driver age, blood alcohol level, victim age, and restraint use*. Obtenido de Elsevier: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457597000936>
- Miller, T., Viner, J., Rossman, S., Pindus, N., Gellert, W., Douglass, J., . . . Blomquist, G. (1991). *The costs of highway crashes*. Obtenido de United States Department of Transportation: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/9369>
- Morales, M. R. (1999). Modernización del Sistema Carretero Troncal. *Unidad de Autopistas de Cuota de la Secretaría de Comunicación y Transportes*, 39.
- MVS Noticias. (2016). *Se registra carambola en la Toluca - Atlacomulco*. Obtenido de <https://mvsnoticias.com/noticias/estados/se-registra-carambola-en-la-carretera-toluca-atlacomulco-646/>
- MVS Noticias. (2019). *Tenería destroza cámaras de vigilancia en autopista Toluca - Atlacomulco*. Obtenido de <https://mvsnoticias.com/noticias/estados/teneria-destroza-camaras-de-vigilancia-en-autopista-toluca-atlacomulco/>
- Nexos. (2017). *Radiografía de los narcobloqueos en México*.
- Notimex. (22 de marzo de 2018). *Lluvia y granizo inundan la México-Toluca*. Obtenido de Noticieros Televisa: <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/lluvia-y-granizo-inundan-mexico-toluca/>
- Posada Henao, J. J., & González Calderón, C. A. (2013). *Consumo de combustible en vehículos para transporte por carretera*. Obtenido de REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN: <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a3>
- Red Acción. (2016). *Bloquean pobladores autopista Toluca*. Obtenido de <http://www.red-accion.mx/2016/04/bloquean-pobladores-autopista-toluca.html>
- (2012). *Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Ríos Bedoya, V., Marquet Sardà, O., & Miralles i Guasch, C. (2016). *Estimación de las emisiones de CO2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5692938>
- Salazar, H. (2009). *Carretera panamericana: ¿una quimera?* Obtenido de BBC: http://www.bbc.com/mundo/america_latina/2009/04/090407_1644_panamericana_quimera_in.shtml
- Santiesteban Rojas, J. C. (2012). *Definición de Redes Bayesianas y sus aplicaciones*. Obtenido de <http://vinculando.org/articulos/redes-bayesianas.html>
- SCT. (1971. 2da. edición). *Normas y procedimientos de conservación y reconstrucción de carreteras*. México: Secretaria de Comunicación y Transporte.
- SCT . (1999). *Modernización del sistema carretero troncal visión a 2010 y 2020*. México: SCT.

- SCT . (2011). *Análisis Costo Beneficio*. Obtenido de <http://manueljosecontrerasmaya.org/descargas/AnalisisCostoBeneficio.pdf>
- SCT . (2012). *El Caminero en la historia*. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/el-caminero-en-la-historia/>
- SCT . (2012). *Quinto informe de Gobierno*. México: Secretaría de Comunicación y Transportes.
- SCT . (2013). *Estudio de Origen - Destino y Peso*. Obtenido de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/O-D-2013/ZONA-2/7.6.-_SAN_SEBASTIAN.pdf
- SCT . (2013). *Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes*. México: DOF.
- SCT . (2014). *Ampliación carretera Atlacomulco Palmillas*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sct/galerias/ampliacion-carretera-atlacomulco-palmillas>
- SCT . (2015). *Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes (2015)*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/180665/Anuario_Estadistico_Sector_Comunicaciones_y_Transportes_2015.pdf
- SCT . (2016). *Datos viales 2016*. Obtenido de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2016/15_MEXICO.pdf
- SCT . (2016). *Longitud de la Red Federal Carretera*. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/longitud-red-federal/>
- SCT . (2016). *México y sus indicadores*. México: Secretaría de Comunicación y Transportes SCT.
- SCT . (2017). *Datos viales 2017*. Obtenido de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2017/00_INTRODUCCION.pdf
- SCT . (2017). *MAPPIR Traza tu Ruta*. Obtenido de http://app.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdEscogeRuta
- SCT . (2018). *Entrega Presidente Enrique Peña Nieto la ampliación de la Autopista Arco Norte, tramo Atlacomulco-Jilotepec*. Obtenido de <https://www.gob.mx/epn/prensa/entrego-el-presidente-enrique-pena-nieto-la-ampliacion-de-la-autopista-arco-norte-tramo-atlacomulco-jilotepec>
- SCT . (2018). *Estadística de Accidentes de Tránsito*. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/estadistica-de-accidentes-de-transito/>
- SCT . (2018). *Manual de proyecto geométrico de carreteras*. Obtenido de Dirección General de Servicios Técnicos: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC_2018_16_11_18.pdf
- SCT . (2019). *Programa Nacional de Conservación de Carreteras 2019*. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/programa-de-trabajo-2019/>
- SEGOB. (2018). *Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018*. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342547&fecha=29%2F04%2F2014

- SEGOB . (2018). *Punto de acuerdo relativo a demandas de vecinos de Atlacomulco*.
Obtenido de Secretaría de Gobernación:
http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2018/10/asun_3763924_20181024_1539892642.pdf
- SEMARNAT. (2018). *Inventario de Emisiones 2015*. Obtenido de
<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/inventario-de-emisiones>
- Torres, G., & Hernández, S. (2009). *Publicación bimestral de divulgación externa Boletín 116*. Obtenido de IMT: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=326&IdBoletin=116>
- Torres, G., Hernández, S., & González, J. A. (2016). *Estimación del valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera de México, 2016*.
Obtenido de Publicación bimestral de divulgación externa IMT núm. 158:
<http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=422&IdBoletin=158>
- Valdés Arias, R. (1990). *Delimitaciones de un Megalopolis*. México: El Colegio Mexiquense, A.C., Universidad Autónoma del Edo. de México.
- Velásquez Ramírez, F. (19 de enero de 2018). *Inicia en un mes rehabilitación de carretera federal 57, Palmillas-Querétaro*. Obtenido de CódigoQro:
<http://codigoqro.mx/2018/01/19/inicia-en-mes-rehabilitacion-carretera-federal-57-palmillas-queretaro/>
- W. Keith, D., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2016). *A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere*. Obtenido de [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(18\)30225-3](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30225-3)

Apéndice A. Análisis del TDPA en estaciones de aforo SCT

TRAMO 1

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Atzacmulco
TE	1
SC	1
X,Y	19.783020 -99.864940
TDPA	16000
A	83.60%
B	2.80%
C2	6.00%
C3	1.20%
T3S2	4.00%
T3S3	1.40%
T3S2R4	0.80%
OTROS	0.20%

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	El Dorado
TE	1
SC	1
X,Y	19.403330 -99.713920
TDPA	25108
A	75.90%
B	5.20%
C2	8.50%
C3	2.50%
T3S2	4.60%
T3S3	1.70%
T3S2R4	1.40%
OTROS	0.20%

TDPA PROMEDIO	20554
TDPA EFECTIVO	16000
A	79.75%
B	4.00%
C2	7.25%
C3	1.85%
T3S2	4.30%
T3S3	1.55%
T3S2R4	1.10%
OTROS	0.20%

TRAMO 2

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Atzacmulco
TE	3
SC	1
X,Y	19.808680 -99.872800
TDPA	12946
A	82.20%
B	2.70%
C2	5.90%
C3	1.90%
T3S2	3.90%
T3S3	1.20%
T3S2R4	1.90%
OTROS	0.30%

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Acambay
TE	3
SC	0
X,Y	19.964660 -99.852490
TDPA	4721
A	82.50%
B	2.40%
C2	7.50%
C3	2.10%
T3S2	3.10%
T3S3	1.40%
T3S2R4	0.60%
OTROS	0.40%

TDPA PROMEDIO	8833.5
TDPA EFECTIVO	4721
A	82.35%
B	2.55%
C2	6.70%
C3	2.00%
T3S2	3.50%
T3S3	1.30%
T3S2R4	1.25%
OTROS	0.35%

TRAMO 3

Carretera	Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)
Lugar	X. C. Toluca - Palmillas
TE	1
SC	1
X,Y	19.916200 -99.851100
TDPA	2681
A	65.10%
B	2.50%
C2	7.20%
C3	2.40%
T3S2	16.50%
T3S3	4.20%
T3S2R4	1.40%
OTROS	0.70%

Carretera	Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)
Lugar	X. C. Toluca - Palmillas
TE	3
SC	1
X,Y	19.923080 -99.838190
TDPA	2590
A	61.90%
B	3.80%
C2	7.90%
C3	3.60%
T3S2	16.70%
T3S3	3.50%
T3S2R4	1.60%
OTROS	1.00%

TDPA PROMEDIO	2635.5
TDPA EFECTIVO	91
A	63.50%
B	3.15%
C2	7.55%
C3	3.00%
T3S2	16.60%
T3S3	3.85%
T3S2R4	1.50%
OTROS	0.85%

TRAMO 4

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Acambay
TE	3
SC	0
X,Y	19.964660 -99.852490
TDPA	4721
A	82.50%
B	2.40%
C2	7.50%
C3	2.10%
T3S2	3.10%
T3S3	1.40%
T3S2R4	0.60%
OTROS	0.40%

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	T. C. México - Querétaro
TE	1
SC	1
X,Y	20.294830 -99.933230
TDPA	6196
A	72.10%
B	4.90%
C2	6.70%
C3	2.70%
T3S2	10.30%
T3S3	2.20%
T3S2R4	0.80%
OTROS	0.30%

TDPA PROMEDIO	5458.5
TDPA EFECTIVO	4721
A	77.30%
B	3.65%
C2	7.10%
C3	2.40%
T3S2	6.70%
T3S3	1.80%
T3S2R4	0.70%
OTROS	0.35%

TRAMO 5

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Ixtlahuaca de Rayón
TE	3
SC	1
X,Y	19.584582 -99.765027
TDPA	20152
A	81.20%
B	4.40%
C2	6.40%
C3	2.30%
T3S2	3.60%
T3S3	1.10%
T3S2R4	0.80%
OTROS	0.20%

Carretera	Toluca - Palmillas
Lugar	Pastejé
TE	1
SC	1
X,Y	19.647570 -99.786250
TDPA	16242
A	78.50%
B	4.40%
C2	6.80%
C3	2.10%
T3S2	4.60%
T3S3	1.70%
T3S2R4	1.60%
OTROS	0.30%

TDPA PROMEDIO	3910
TDPA EFECTIVO	3910
A	81.20%
B	4.40%
C2	6.40%
C3	2.30%
T3S2	3.60%
T3S3	1.10%
T3S2R4	0.80%
OTROS	0.20%

TRAMO 6

Carretera	Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)
Lugar	X. C. Toluca - Palmillas
TE	3
SC	1
X,Y	19.923080 -99.838190
TDPA	2590
A	61.90%
B	3.80%
C2	7.90%
C3	3.60%
T3S2	16.70%
T3S3	3.50%
T3S2R4	1.60%
OTROS	1.00%

Carretera	Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)
Lugar	C. P. Jilotepec
TE	1
SC	1
X,Y	19.970160 -99.537290
TDPA	3274
A	65.50%
B	3.40%
C2	6.20%
C3	2.30%
T3S2	15.80%
T3S3	3.60%
T3S2R4	2.30%
OTROS	0.90%

TDPA PROMEDIO	2932
TDPA EFECTIVO	2590
A	63.70%
B	3.60%
C2	7.05%
C3	2.95%
T3S2	16.25%
T3S3	3.55%
T3S2R4	1.95%
OTROS	0.95%

TRAMO 7

Carretera	México - Querétaro (Cuota)
Lugar	T. Izq. Jilotepec
TE	3
SC	1
X,Y	19.985670 -99.443640
TDPA	23018
A	70.80%
B	5.30%
C2	4.10%
C3	3.50%
T3S2	10.90%
T3S3	2.70%
T3S2R4	2.40%
OTROS	0.30%

Carretera	México - Querétaro (Cuota)
Lugar	T. Izq. Toluca
TE	1
SC	1
X,Y	20.292080 -99.921750
TDPA	22472
A	68.30%
B	5.20%
C2	6.00%
C3	3.30%
T3S2	9.70%
T3S3	4.00%
T3S2R4	3.10%
OTROS	0.40%

TDPA PROMEDIO	22745
TDPA EFECTIVO	22472
A	69.55%
B	5.25%
C2	5.05%
C3	3.40%
T3S2	10.30%
T3S3	3.35%
T3S2R4	2.75%
OTROS	0.35%

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
TDPA PROMEDIO	20554	8833.5	2635.5	5458.5	3910	2932	22745
TDPA EFECTIVO	16000	4721	91	4721	3910	2590	22472
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2

DISTRIBUCIÓN							
A	79.75%	82.35%	63.50%	77.30%	81.20%	63.70%	69.55%
B	4.00%	2.55%	3.15%	3.65%	4.40%	3.60%	5.25%
C2	7.25%	6.70%	7.55%	7.10%	6.40%	7.05%	5.05%
C3	1.85%	2.00%	3.00%	2.40%	2.30%	2.95%	3.40%
T3S2	4.30%	3.50%	16.60%	6.70%	3.60%	16.25%	10.30%
T3S3	1.55%	1.30%	3.85%	1.80%	1.10%	3.55%	3.35%
T3S2R4	1.10%	1.25%	1.50%	0.70%	0.80%	1.95%	2.75%
OTROS	0.20%	0.35%	0.85%	0.35%	0.20%	0.95%	0.35%

Nodo	A	B	C	D	A	B	C	D	
TDPA PROMEDIO	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	N/A	5458.5
TDPA EFECTIVO	1	2	4	N/A	16000	4721	4721	N/A	4721
A	1	2	4	N/A	79.75%	82.35%	77.30%	N/A	79.80%
B	1	2	4	N/A	4.00%	2.55%	3.65%	N/A	3.40%
C2	1	2	4	N/A	7.25%	6.70%	7.10%	N/A	7.02%
C3	1	2	4	N/A	1.85%	2.00%	2.40%	N/A	2.08%
T3S2	1	2	4	N/A	4.30%	3.50%	6.70%	N/A	4.83%
T3S3	1	2	4	N/A	1.55%	1.30%	1.80%	N/A	1.55%
T3S2R4	1	2	4	N/A	1.10%	1.25%	0.70%	N/A	1.02%
OTROS	1	2	4	N/A	0.20%	0.35%	0.35%	N/A	0.30%

Apéndice B. Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento de tiempo de traslado

Tramo	1
Longitud (m)	45400.000
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)
TDPARP (vpd)	4721

Subtramo 1: Toluca - Atlacomulco (57) d= 45,400m IIR = 4, Tt = Lomerío									
vehículo	Distribución vehicular	ui	uefi = ui-1	Nj	dj	vj	Tj	Tp	T(i,j)
		(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(m)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.36	171038053.20	65.94	2478.62	9337837.30	11952431.74
B	3.40%	12.81	11.81	160.51	7287335.60	62.12	2631.04	422318.23	4987578.24
C2	7.02%	1.37	0.37	331.26	15039060.23	53.77	3039.61	1006892.63	372550.27
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35	4465279.17	46.26	3533.07	347492.54	79923.28
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.18	10359447.67	50.12	3260.97	744094.41	104173.22
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.18	3322167.70	43.36	3769.37	275825.73	38615.60
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	48.00	2179056.23	34.00	4807.06	230723.60	20765.12
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.16	643000.20	50.80	3217.59	45570.79	4101.37
Total									17560138.86

Tramo	2
Longitud (m)	23300.000
Tipo de terreno	M
IIR	6
Descripción	Atlacomulco - Acambay (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(m)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779441.4	50.76	1652.48	6225492.30	7968630.141
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739976.2	46.94	1786.96	286832.43	3387491.012
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718284.217	41.23	2034.44	673922.46	249351.3116
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291652.083	34.86	2406.20	236659.42	54431.66738
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	5316632.833	36.76	2281.83	520671.33	72893.98662
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704989.15	31.68	2647.73	193748.77	27124.82739
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118326.217	24.85	3375.45	162011.04	14580.99373
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329997.9	38.15	2198.44	31136.54	2802.288592
Total									11777306.23

Tramo	3
Longitud (m)	23300.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Atlacomulco - Acambay (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Np (persona/veh)	Npef (persona/veh)	Nv1 (veh)	D1 (m)	Vp1 (Km/h)	Tv (s/veh)	Tp (s/persona)	T (s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779441.4	51.46	1630.00	6140808.18	7860234.473
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739976.2	47.52	1765.15	283331.53	3346145.373
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718284.217	42.09	1992.87	660152.61	244256.4642
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291652.083	35.38	2370.83	233181.11	53631.65418
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	5316632.833	37.57	2232.63	509445.79	71322.41011
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704989.15	32.21	2604.16	190560.72	26678.50145
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118326.217	25.16	3333.86	160014.88	14401.3392
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329997.9	38.77	2163.53	30642.05	2757.784875
Total									11619428

Tramo	4
Longitud (m)	53900.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Acambay - Palmillas (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Np (persona/veh)	Npef (persona/veh)	Nv1 (veh)	D1 (m)	Vp1 (Km/h)	Tv (s/veh)	Tp (s/persona)	T (s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	203060596.2	51.46	3770.70	14205560.56	18183117.51
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	8651704.6	47.52	4083.33	655432.17	7740653.888
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	17854743.32	42.09	4610.12	1527134.14	565039.6317
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	5301289.583	35.38	5484.45	539418.95	124066.3588
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	12298991.83	37.57	5164.76	1178503.34	164990.468
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	3944159.45	32.21	6024.22	440825.02	61715.50335
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	2587029.317	25.16	7712.24	370163.18	33314.68595
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	763385.7	38.77	5004.90	70884.41	6379.596771
Total									26879277.65

Tramo	5
Longitud (m)	83100.000
Tipo de terreno	L
HIR	8
Descripción	Toluca - Jilotepec (11)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Np (persona/veh)	Npef (persona/veh)	Nv1 (veh)	D1 (m)	Vp1 (Km/h)	Tv (s/veh)	Tp (s/persona)	T (s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	313067449.8	60.9	4912.32	18506450.23	23688256.3
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	13338713.4	57.38	5213.66	836865.95	9883386.875
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	27527442.85	48.37	6184.83	2048765.65	758043.2887
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	8173231.25	42.88	6976.68	686185.46	157822.6557
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	18961896.5	42.9	6973.43	1591208.10	222769.1337
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	6080884.05	38.8	7710.31	564205.74	78988.80312
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	3988536.85	31.77	9416.43	451958.85	40676.29649
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	1176945.3	46.14	6483.34	91823.60	8264.123654
Total									34838207.48

Tramo	6
Longitud (m)	39100.000
Tipo de terreno	L
HIR	4
Descripción	Acambay - Jilotepec (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Np (persona/veh)	Npef (persona/veh)	Nv1 (veh)	D1 (m)	Vp1 (Km/h)	Tv (s/veh)	Tp (s/persona)	T (s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	147303697.8	65.94	2134.67	8042058.11	10293834.39
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	6276097.4	62.12	2265.94	363714.59	4295469.367
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	12952142.18	53.77	2617.82	867169.65	320852.769
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	3845647.917	46.26	3042.80	299272.21	68832.60863
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	8921903.167	50.12	2808.46	640839.01	89717.46201
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	2861162.05	43.36	3246.31	237550.35	33257.04966
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1876676.183	34	4140.00	198706.89	17883.6201
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	553773.3	50.80	2771.10	39247.09	3532.23794
Total									15123379.5

Tramo	7
Longitud (m)	67200.000
Tipo de terreno	L
IIR	2
Descripción	Jilotepec - Palmillas (57D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(m)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	253166457.6	66.72	3625.90	13660060.66	17484877.65
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	10786540.8	62.78	3853.46	618533.72	7304883.222
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	22260459.2	54.69	4423.48	1465307.24	542163.6799
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	6609400	46.88	5160.41	507547.78	116735.9898
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	15333808	51.04	4739.81	1081538.18	151415.3455
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	4917393.6	44	5498.18	402332.20	56326.50851
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	3225387.2	34.42	7028.47	337344.39	30360.99514
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	951753.6	51.50	4697.08	66524.81	5987.233142
								Total	25692750.62

Resumen por tramo

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tiempo promedio* (min)	41.31	27.54	27.17	62.84	81.87	35.58	60.43
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
T (s)	2E+07	1E+07	1E+07	26879277.65	34838207.48	15123379.5	25692750.62

* Tiempo de recorrido promedio para un vehículo ligero

Resumen por ruta (Longitud)

Nodo	A	B	C	D	Longitud Total
					(km)
Ruta principal	1	2	4	N/A	122.6
Ruta alterna 1	1	2	6	7	175
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	122.6
Ruta alterna 3	1	3	6	7	175
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	176.1
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	150.3

Resumen por ruta (Tiempo total acumulado)

SHP 2016 43.19 \$/hr Valor del tiempo por motivo de trabajo en 2016*

Nodo	A	B	C	D	Tiempo total*	Delta T	Delta T	CIHHd	CIHHh	CIHHs	%
					(s)	(s)	(hr perdida/día)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/s)	adimensional
Ruta principal	1	2	4	N/A	56216722.73	0**	0**	0**	0**	0**	1.000
Ruta alterna 1	1	2	6	7	70153575.21	13936852.5	3871.347909	167203.5162	6966.813175	1.935225882	1.248
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	56058844.5	-157878.229	-43.85506368	-1894.1002	-78.92084167	-0.021922456	0.997
Ruta alterna 3	1	3	6	7	69995696.98	13778974.2	3827.492846	165309.416	6887.892334	1.913303426	1.245
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	76840864.63	20624141.9	5728.928303	247432.4134	10309.68389	2.863801081	1.367
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	60530958.1	4314235.36	1198.398712	51758.84038	2156.618349	0.599060653	1.077

* <http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=422&IdBoletin=158>

** El tiempo del operador no se incluye pues ya está incluido en el Modelo de costos operacionales

Apéndice C. Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados

Tramo											
Longitud (km)	45400.000	Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
Tipo de terreno	L	vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
IIR	4	A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	171038.0532	65.94	2478.62	9337837.30	11952431.74
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	B	3.40%	12.81	11.81	160.514	7287.3356	62.12	2631.04	422318.23	4987578.242
TDPARP (vpd)	4721	C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	15039.06023	53.77	3039.61	1006892.63	372550.274
		C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	4465.279167	46.26	3533.07	347492.54	79923.2847
		T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	10359.44767	50.12	3260.97	744094.41	104173.2168
		T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	3322.1677	43.36	3769.37	275825.73	38615.60242
		T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	2179.056233	34	4807.06	230723.60	20765.12411
		OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	643.0002	50.80	3217.59	45570.79	4101.370908
										Total	17560138.86

Tramo											
Longitud (km)	23300.000	Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
Tipo de terreno	M	vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
IIR	6	A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779.4414	50.76	1652.48	6225492.30	7968630.141
Descripción	Atlacomulco - Acambay (57)	B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739.9762	46.94	1786.96	286832.43	3387491.012
TDPARP (vpd)	4721	C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718.284217	41.23	2034.44	673922.46	249351.3116
		C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291.652083	34.86	2406.20	236659.42	54431.66738
		T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	5316.632833	36.76	2281.83	520671.33	72893.98662
		T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704.98915	31.68	2647.73	193748.77	27124.82739
		T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118.326217	24.85	3375.45	162011.04	14580.99373
		OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329.9979	38.15	2198.44	31136.54	2802.288592
										Total	11777306.23

Tramo	3
Longitud (km)	23300.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Atlacomulco - Acambay (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779.4414	51.46	1630.00	6140808.18	7860234.473
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739.9762	47.52	1765.15	283331.53	3346145.373
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718.284217	42.09	1992.87	660152.61	244256.4642
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291.652083	35.38	2370.83	233181.11	53631.65418
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	5316.632833	37.57	2232.63	509445.79	71322.41011
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704.98915	32.21	2604.16	190560.72	26678.50145
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118.326217	25.16	3333.86	160014.88	14401.3392
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329.9979	38.77	2163.53	30642.05	2757.784875
Total									11619428

Tramo	4
Longitud (km)	53900.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Acambay - Palmillas (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	203060.5962	51.46	3770.70	14205560.56	18183117.51
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	8651.7046	47.52	4083.33	655432.17	7740653.888
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	17854.74332	42.09	4610.12	1527134.14	565039.6317
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	5301.289583	35.38	5484.45	539418.95	124066.3588
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	12298.99183	37.57	5164.76	1178503.34	164990.468
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	3944.15945	32.21	6024.22	440825.02	61715.50335
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	2587.029317	25.16	7712.24	370163.18	33314.68595
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	763.3857	38.77	5004.90	70884.41	6379.596771
Total									26879277.65

Tramo	5
Longitud (km)	83100.000
Tipo de terreno	L
IIR	8
Descripción TDPARP (vpd)	Toluca - Jilotepec (11) 4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	313067.4498	60.9	4912.32	18506450.23	23688256.3
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	13338.7134	57.38	5213.66	836865.95	9883386.875
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	27527.44285	48.37	6184.83	2048765.65	758043.2887
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	8173.23125	42.88	6976.68	686185.46	157822.6557
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	18961.8965	42.9	6973.43	1591208.10	222769.1337
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	6080.88405	38.8	7710.31	564205.74	78988.80312
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	3988.53685	31.77	9416.43	451958.85	40676.29649
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	1176.9453	46.14	6483.34	91823.60	8264.123654
Total									34838207.48

Tramo	6
Longitud (km)	39100.000
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción TDPARP (vpd)	Acambay - Jilotepec (40D) 4721

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	147303.6978	65.94	2134.67	8042058.11	10293834.39
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	6276.0974	62.12	2265.94	363714.59	4295469.367
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	12952.14218	53.77	2617.82	867169.65	320852.769
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	3845.647917	46.26	3042.80	299272.21	68832.60863
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	8921.903167	50.12	2808.46	640839.01	89717.46201
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	2861.16205	43.36	3246.31	237550.35	33257.04966
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1876.676183	34	4140.00	198706.89	17883.6201
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	553.7733	50.80	2771.10	39247.09	3532.23794
Total									15123379.5

Variable	Pv1	Np	Npef	Nv1	D1	Vp1	Tv	Tp	T
vehículo	(%)	(persona/veh)	(persona/veh)	(veh)	(km)	(Km/h)	(s/veh)	(s/persona)	(s)
A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	253166.4576	66.72	3625.90	13660060.66	17484877.65
B	3.40%	12.81	11.81	160.514	10786.5408	62.78	3853.46	618533.72	7304883.222
C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	22260.4592	54.69	4423.48	1465307.24	542163.6799
C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	6609.4	46.88	5160.41	507547.78	116735.9898
T3S2	4.83%	1.14	0.14	228.1816667	15333.808	51.04	4739.81	1081538.18	151415.3455
T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	4917.3936	44	5498.18	402332.20	56326.50851
T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	3225.3872	34.42	7028.47	337344.39	30360.99514
OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	951.7536	51.50	4697.08	66524.81	5987.233142
Total									25692750.62

Tramo	7
Longitud (km)	67200.000
Tipo de terreno	L
IIR	2
Descripción	Jilotepec - Palmillas (57D)
TDPARP (vpd)	4721

Resumen por tramo

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tiempo promedio* (min)	41.31	27.54	27.17	62.84	81.87	35.58	60.43
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
T (s)	17560138.86	11777306.23	11619428	26879277.65	34838207.48	15123379.5	25692750.62

* Tiempo de recorrido promedio para un vehículo ligero

Resumen por ruta (Longitud)

Nodo	A	B	C	D	Longitud Total
					(km)
Ruta principal	1	2	4	N/A	122.6
Ruta alterna 1	1	2	6	7	175
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	122.6
Ruta alterna 3	1	3	6	7	175
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	176.1
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	150.3

Resumen Número de personas que serán afectadas (sólo las de la ruta principal)

Variable	Pv1	Np	Nv1	Pp
	(%)	(persona/veh)	(veh)	(personas/día)
vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	No. De vehículos	Total de personas afectadas por bajo rendimiento por día*
A	79.80%	2.28	3767.358	8589.58
B	3.40%	12.81	160.514	2056.18
C2	7.02%	1.37	331.2568333	453.82
C3	2.08%	1.23	98.35416667	120.98
T3S2	4.83%	1.14	228.1816667	260.13
T3S3	1.55%	1.14	73.1755	83.42
T3S2R4	1.02%	1.09	47.99683333	52.32
OTROS	0.30%	1.09	14.163	15.44
		Total		11631.86

* SI incluye la baja productividad del operador por eso se utiliza Np en lugar de Npef

Resumen:	Cálculo de factores necesarios para determinar el costo indirecto baja productividad laboral		
Js	42.793	hrs/semana	Horas laborables promedio a la semana (EdoMex)*
J	8.5586	hr	horas laborables al día (Tomando en cuenta 5 días laborables a la semana)
Sm	80.04	\$/día	Salario Mínimo vigente área geográfica única
Smh	9.35	\$/hr	Salario Mínimo vigente área geográfica única (por hora)

Resumen por ruta (Tiempo total acumulado)

SHP 2016	43.19	\$/hr	Valor del tiempo por motivo de trabajo en 2016*
-----------------	-------	-------	---

Nodo	A	B	C	D	Tiempo total*	DeltaT	Ip	Dp	Jp	CIPp	Pp	CIPd	CIPhr	CIPs	%	
					(s)	(%)	(%)	(%)	(hrs)	(\$/persona)	(personas/día)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/s)	adimensional	
					Tiempo total acumulado por los vehículos	Porcentaje tiempo excedente	Índice de Productividad	Déficit de productividad	Horas no laboradas por mala productividad	Costo indirecto baja productividad (por persona)	Total de personas afectadas por bajo rendimiento por día	Costo indirecto baja productividad	Costo indirecto baja productividad	Costo indirecto baja productividad	Relación ruta principal vs ruta alterna	
Ruta principal	1	2	4	N/A	56216722.73											1.000
Ruta alterna 1	1	2	6	7	70153575.21	124.79%	97.00%	3%	0.256758	\$ 2.401	11631.86	\$ 27,930.42	\$ 1,163.77	\$ 0.32		1.030
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	56058844.50	99.72%	0.00%	0%	0	\$ -	11631.86	\$ -	\$ -	\$ -		1.000
Ruta alterna 3	1	3	6	7	69995696.98	124.51%	97.00%	3%	0.256758	\$ 2.401	11631.86	\$ 27,930.42	\$ 1,163.77	\$ 0.32		1.030
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	76840864.63	136.69%	95.00%	5%	0.42793	\$ 4.002	11631.86	\$ 46,550.70	\$ 1,939.61	\$ 0.54		1.050
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	60530958.10	107.67%	97.00%	3%	0.256758	\$ 2.401	11631.86	\$ 27,930.42	\$ 1,163.77	\$ 0.32		1.030

* <http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=422&IdBoletin=158>

Apéndice D. Modelo numérico para el cálculo del incremento en los costos operacionales generados

Tramo	1
Longitud (km)	45.400
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP1
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	171038.0532	4.81	\$ 822,693.04
B	3.40%	160.514	7287.3356	17.18	\$ 125,196.43
C2	7.02%	331.2568333	15039.06023	10.66	\$ 160,316.38
C3	2.08%	98.35416667	4465.279167	15.12	\$ 67,515.02
T3S2	4.83%	228.1816667	10359.44767	19.96	\$ 206,774.58
T3S3	1.55%	73.1755	3322.1677	23.50	\$ 78,070.94
T3S2R4	1.02%	47.99683333	2179.056233	31.16	\$ 67,899.39
OTROS	0.30%	14.163	643.0002	17.48	\$ 11,242.40
Total					\$ 1,539,708.17

Tramo	2
Longitud (km)	23.300
Tipo de terreno	M
IIR	6
Descripción	Jilotepec - Palmillas (57D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP2
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	87779.4414	5.72	\$ 502,098.40
B	3.40%	160.514	3739.9762	21.74	\$ 81,307.08
C2	7.02%	331.2568333	7718.284217	14.00	\$ 108,055.98
C3	2.08%	98.35416667	2291.652083	20.04	\$ 45,924.71
T3S2	4.83%	228.1816667	5316.632833	25.93	\$ 137,860.29
T3S3	1.55%	73.1755	1704.98915	30.91	\$ 52,701.21
T3S2R4	1.02%	47.99683333	1118.326217	41.40	\$ 46,298.71
OTROS	0.30%	14.163	329.9979	22.82	\$ 7,530.55
Total					\$ 981,776.94

Tramo	3
Longitud (km)	23.300
Tipo de terreno	M
HIR	4
Descripción	Atlaomulco - Acambay (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP3
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	87779.4414	5.42	\$ 475,764.57
B	3.40%	160.514	3739.9762	21.01	\$ 78,576.90
C2	7.02%	331.2568333	7718.284217	13.08	\$ 100,955.16
C3	2.08%	98.35416667	2291.652083	19.09	\$ 43,747.64
T3S2	4.83%	228.1816667	5316.632833	24.59	\$ 130,736.00
T3S3	1.55%	73.1755	1704.98915	29.46	\$ 50,228.98
T3S2R4	1.02%	47.99683333	1118.326217	39.64	\$ 44,330.45
OTROS	0.30%	14.163	329.9979	21.76	\$ 7,179.34
Total					\$ 931,519.04

Tramo	4
Longitud (km)	53.900
Tipo de terreno	M
HIR	4
Descripción	Acambay - Palmillas (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP4
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	203060.5962	5.42	\$ 1,100,588.43
B	3.40%	160.514	8651.7046	21.01	\$ 181,772.31
C2	7.02%	331.2568333	17854.74332	13.08	\$ 233,540.04
C3	2.08%	98.35416667	5301.289583	19.09	\$ 101,201.62
T3S2	4.83%	228.1816667	12298.99183	24.59	\$ 302,432.21
T3S3	1.55%	73.1755	3944.15945	29.46	\$ 116,194.94
T3S2R4	1.02%	47.99683333	2587.029317	39.64	\$ 102,549.84
OTROS	0.30%	14.163	763.3857	21.76	\$ 16,608.00
Total					\$ 2,154,887.40

Tramo	5
Longitud (km)	83.100
Tipo de terreno	L
IIR	8
Descripción	Toluca - Jilotepec (11)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP5
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	313067.4498	5.53	\$ 1,731,263.00
B	3.40%	160.514	13338.7134	18.59	\$ 247,966.68
C2	7.02%	331.2568333	27527.44285	12.40	\$ 341,340.29
C3	2.08%	98.35416667	8173.23125	16.91	\$ 138,209.34
T3S2	4.83%	228.1816667	18961.8965	22.69	\$ 430,245.43
T3S3	1.55%	73.1755	6080.88405	26.40	\$ 160,535.34
T3S2R4	1.02%	47.99683333	3988.53685	34.61	\$ 138,043.26
OTROS	0.30%	14.163	1176.9453	19.59	\$ 23,056.36
				Total	\$ 3,210,659.70

Tramo	6
Longitud (km)	39.100
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción	Acambay - Jilotepec (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP6
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	147303.6978	4.81	\$ 708,530.79
B	3.40%	160.514	6276.0974	17.18	\$ 107,823.35
C2	7.02%	331.2568333	12952.14218	10.66	\$ 138,069.84
C3	2.08%	98.35416667	3845.647917	15.12	\$ 58,146.20
T3S2	4.83%	228.1816667	8921.903167	19.96	\$ 178,081.19
T3S3	1.55%	73.1755	2861.16205	23.50	\$ 67,237.31
T3S2R4	1.02%	47.99683333	1876.676183	31.16	\$ 58,477.23
OTROS	0.30%	14.163	553.7733	17.48	\$ 9,682.33
				Total	\$ 1,326,048.23

Tramo	7
Longitud (km)	67.200
Tipo de terreno	L
IIR	2
Descripción	Jilotepec - Palmillas (57D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1	Nv1	D1	COV	CIOP7
	(%)	(veh)	(km)	(\$/km)	(\$/día)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Costo operacional	Costo operacional por día
A	79.80%	3767.358	253166.4576	4.58	\$ 1,159,502.38
B	3.40%	160.514	10786.5408	16.56	\$ 178,625.12
C2	7.02%	331.2568333	22260.4592	9.76	\$ 217,262.08
C3	2.08%	98.35416667	6609.4	14.20	\$ 93,853.48
T3S2	4.83%	228.1816667	15333.808	18.67	\$ 286,282.20
T3S3	1.55%	73.1755	4917.3936	22.10	\$ 108,674.40
T3S2R4	1.02%	47.99683333	3225.3872	29.48	\$ 95,084.41
OTROS	0.30%	14.163	951.7536	16.48	\$ 15,683.54
Total					\$ 2,154,967.60

Resumen

Tramo	A	B	C	D	Longitud Total	COV	CIOPd	CIOPh	CIOPs	%
					(km)	(\$/d)	(\$/d)	(\$/h)	(\$/s)	adimensional
Ruta principal	1	2	4	N/A	122.6	\$ 4,676,372.50	0*	0*	0*	1.000
Ruta alterna 1	1	2	6	7	175	\$ 6,002,500.94	1,326,128.43	55,255.35	15.35	1.284
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	122.6	\$ 4,626,114.61	- 50,257.89	- 2,094.08	- 0.58	0.989
Ruta alterna 3	1	3	6	7	175	\$ 5,952,243.04	\$ 1,275,870.54	\$ 53,161.27	\$ 14.77	1.273
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	176.1	\$ 6,691,595.32	\$ 2,015,222.82	\$ 83,967.62	\$ 23.32	1.431
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	150.3	\$ 5,365,627.30	\$ 689,254.80	\$ 28,718.95	\$ 7.98	1.147

La ruta principal no genera
* consecuencias o costos indirectos

Apéndice E. Modelo numérico para el cálculo de las emisiones de CO₂ generadas

		Variable	Pvl (%)	Np (persona/veh)	Npef (persona/veh)	Nvl (veh)	Dl (km)	Vpl (Km/h)	Tv (s/veh)	Tp (s/persona)	T (s)	Epl (g/km)	Cc (\$/ton)
		Vehículo	Distribución de vehículos	Personas promedio por vehículo (incluyendo operador)	Personas promedio por vehículo (sin operador)	No. De vehículos	Distancia recorrida acumulada	Velocidad promedio	Tiempo en cruzar por vehículo	Tiempo total acumulado por persona	Tiempo total acumulado	Emisiones promedio de CO2	Costo total CO2
Tramo	1	A	79.80%	2.28	1.28	3767.36	171038.05	65.94	2478.65	933787.30	11952431.74	206.90	\$ 159242.42
		B	3.40%	12.81	11.81	160.51	7287.34	62.12	2631.04	422318.23	4987578.242	426.38	\$ 15982.31
		C2	7.02%	1.37	0.37	331.26	15039.06	53.77	3039.61	1006892.63	372550.274	298.98	\$ 20,233.93
Longitud (m)	45400.000	C3	2.08%	1.23	0.23	98.35	4465.28	46.26	3533.07	347492.54	79923.2847	924.03	\$ 18,567.28
Tipo de terreno	L	T3S2	4.83%	1.14	0.14	238.18	10359.45	50.12	3260.97	744094.41	104173.2168	831.63	\$ 38,768.48
IR	4	T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.18	3322.17	43.36	3769.37	275825.73	38615.60242	1396.25	\$ 20,873.57
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	48.00	2179.06	34	4807.06	230723.60	20765.12411	1535.87	\$ 15,060.39
TDPARP (vpd)	4721	OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.16	643.00	50.80	3217.59	45570.79	4101.370988	802.86	\$ 2,323.09
										Total	17560138.86	Total	\$ 289051.47
Tramo	2	A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779.4414	50.76	1652.48	6225492.30	7966830.141	206.90	\$ 81,725.74
		B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739.9762	46.94	1786.96	286832.43	3387491.012	426.38	\$ 7,175.94
		C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718.284217	41.23	2034.44	673922.46	249351.316	298.98	\$ 10,384.38
Longitud (m)	23300.000	C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291.652083	34.86	2406.20	236699.42	54431.66738	924.03	\$ 9,529.02
Tipo de terreno	M	T3S2	4.83%	1.14	0.14	238.1816667	5316.632833	36.76	2281.83	520671.33	728939662	831.63	\$ 19,896.60
IR	6	T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704.98915	31.68	2647.73	27134.82739	193748.77	1396.25	\$ 10,712.65
Descripción	Atlacomulco - Acambay (57)	T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118.326217	24.85	3375.45	162011.04	14580.99373	1535.87	\$ 7,729.23
TDPARP (vpd)	4721	OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329.9979	38.15	2198.44	31136.54	2802.288592	802.86	\$ 1,922.24
										Total	11777306.23	Total	\$ 148,345.80
Tramo	3	A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	87779.4414	51.46	1630.00	614808.18	7860234.473	206.90	\$ 81,725.74
		B	3.40%	12.81	11.81	160.514	3739.9762	47.52	1765.15	283311.53	3346183.373	426.38	\$ 7,175.94
		C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	7718.284217	42.09	1992.87	660152.61	244256.4642	298.98	\$ 10,384.38
Longitud (m)	23300.000	C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	2291.652083	35.38	2370.83	233181.11	53631.65418	924.03	\$ 9,529.02
Tipo de terreno	M	T3S2	4.83%	1.14	0.14	238.1816667	5316.632833	37.57	2232.63	509445.79	71322.41011	831.63	\$ 19,896.60
IR	4	T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	1704.98915	32.21	2604.16	190560.72	26678.50145	1396.25	\$ 10,712.65
Descripción	Atlacomulco - Acambay (40D)	T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	1118.326217	25.16	3333.86	160014.88	14401.3392	1535.87	\$ 7,729.23
TDPARP (vpd)	4721	OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	329.9979	38.77	2163.53	30542.05	2757.78875	802.86	\$ 1,922.24
										Total	11619428	Total	\$ 148,345.80
Tramo	4	A	79.80%	2.28	1.28	3767.358	203060.5962	51.46	3770.70	14205560.56	18183117.51	206.90	\$ 189,056.53
		B	3.40%	12.81	11.81	160.514	8651.7046	47.52	4083.33	655432.17	7740653.888	426.38	\$ 16,600.14
		C2	7.02%	1.37	0.37	331.2568333	17854.74332	42.09	4610.12	1527134.14	565039.6317	298.98	\$ 24,022.23
Longitud (m)	53900.000	C3	2.08%	1.23	0.23	98.35416667	5301.289583	35.38	5484.45	539418.95	124066.3588	924.03	\$ 22,043.53
Tipo de terreno	M	T3S2	4.83%	1.14	0.14	238.1816667	12298.99183	37.57	5164.76	1178503.34	164991.468	831.63	\$ 46,028.90
IR	4	T3S3	1.55%	1.14	0.14	73.1755	3944.15945	32.21	6024.22	440825.02	61715.50335	1396.25	\$ 24,781.62
Descripción	Acambay - Palmitas (57)	T3S2R4	1.02%	1.09	0.09	47.99683333	2587.029317	25.16	7712.24	370163.18	3334.68895	1535.87	\$ 17,880.07
TDPARP (vpd)	4721	OTROS	0.30%	1.09	0.09	14.163	763.3857	38.77	5004.90	70884.41	6379.596771	802.86	\$ 2,758.02
										Total	26879277.65	Total	\$ 343,169.03

Resumen por ruta

Nodo	A	B	C	D	Cc	CIMAd	CIMAh	CIMAs	%
					(\$)	(\$/d)	(\$/hr)	(\$/s)	adimensional
					Costo total CO2	Costo por tratar el excedente de CO2 por día	Costo por tratar el excedente de CO2 por hora	Costo por tratar el excedente de CO2 por segundo	Relación ruta principal vs ruta alterna
Ruta principal	1	2	4	N/A	\$ 780,566.29	0*	0*	0*	1.000
Ruta alterna 1	1	2	6	7	\$ 1,114,185.17	\$ 333,618.87	\$ 13,900.79	\$ 3.86	1.427
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	\$ 780,566.29	\$ -	\$ -	\$ -	1.000
Ruta alterna 3	1	3	6	7	\$ 1,114,185.17	\$ 333,618.87	\$ 13,900.79	\$ 3.86	1.427
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	\$ 1,121,188.62	\$ 340,622.32	\$ 14,192.60	\$ 3.94	1.436
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	\$ 956,925.89	\$ 176,359.59	\$ 7,348.32	\$ 2.04	1.226

* La ruta principal no genera consecuencias

Apéndice F. Estimación del costo promedio por accidente en el Estado de México

Saldos por tramo Estado de México*					
Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales (2015)					
Ruta	Colisiones	Cadenamiento	Daños materiales	Daños materiales por año (\$/año)	Costo promedio por accidente
	(accidente/año)	(km)	(Miles de dólares**/año)	(\$/año)	\$/accidente
MEX-150D	80.00	17 a 32	197.90	\$ 3,593,864.00	\$ 44,923.30
MEX-015	67.00	33.44 a 51.65	386.50	\$ 7,018,840.00	\$ 104,758.81
MEX-115	88.00	0 a 28	166.20	\$ 3,018,192.00	\$ 34,297.64
MEX-055	41.00	5 a 23	86.70	\$ 1,574,472.00	\$ 38,401.76
MEX-142	7.00	0 a 3.1	40.30	\$ 731,848.00	\$ 104,549.71
MEX-087	13.00	0 a 5.9	21.50	\$ 390,440.00	\$ 30,033.85
MEX-057D	71.00	26.8 a 59.8	244.00	\$ 4,431,040.00	\$ 62,409.01
MEX-150D	61.00	32 a 63.75	264.50	\$ 4,803,320.00	\$ 78,742.95
MEX-057D	39.00	84.3 a 106.8	316.50	\$ 5,747,640.00	\$ 147,375.38
MEX-085D	64.00	9 a 46.6	197.80	\$ 3,592,048.00	\$ 56,125.75
Promedio	53.10	N/A	192.19	\$ 3,490,170.40	\$ 65,728.26

* <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt66.pdf>

Valor del dólar al momento

** de realizar el cálculo \$18.16

Apéndice G. Modelo numérico para el cálculo de los costos materiales en accidentes

Nodo	A	B	C	D	TDPA			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	2932	22745
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	2635.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	2635.5	2932	22745
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	3910	2932	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	3910	22745	0	0

Nodo	A	B	C	D	TDPAsum*			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	0	0	0	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	0	0	4721	4721
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	0	4721	0	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	0	4721	4721	4721
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	4721	4721	0	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	4721	4721	0	0

* Vehículos que pasarían de más provenientes de la ruta original

Nodo	A	B	C	D	TDPAef**			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	7653	27466
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	7356.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	7356.5	7653	27466
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	8631	7653	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	8631	27466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				TDPAef**			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	8.8335	5.4585	0
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	8.8335	7.653	27.466
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	7.3565	5.4585	0
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	7.3565	7.653	27.466
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	8.631	7.653	5.4585	0
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	8.631	27.466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				Accidentes/km/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.48	0.48	0.32	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.48	0.48	0.43	1.14
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.48	0.42	0.32	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.48	0.42	0.43	1.14
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.46	0.43	0.32	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	0.46	1.14	0.00	0.00

* PT345 IMT

Nodo	Longitud por tramo (km)				Accidentes/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	45.4	23.3	53.9	0	21.71	11.24	17.22	0.00
Ruta alterna 1	45.4	23.3	39.1	67.2	21.71	11.24	16.79	76.48
Ruta alterna 2	45.4	23.3	53.9	0	21.71	9.75	17.22	0.00
Ruta alterna 3	45.4	23.3	39.1	67.2	21.71	9.75	16.79	76.48
Ruta alterna 4	83.1	39.1	53.9	0	38.40	16.79	17.22	0.00
Ruta alterna 5	83.1	67.2	0	0	38.40	76.48	0.00	0.00

* PT345 IMT

Nodo	TOTAL	CPM	CPMa	CPMd	CPMhr	CPMm	CPMs
	(accidentes/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/min)	(\$/s)
Ruta principal	50.16	3296858.97					
Ruta alterna 1	126.20	8295206.81	4998347.84	13731.72	572.16	9.54	0.159
Ruta alterna 2	48.67	3199005.04	-97853.92	-268.83	-11.20	-0.19	-0.003
Ruta alterna 3	124.72	8197352.88	4900493.92	13462.90	560.95	9.35	0.156
Ruta alterna 4	72.41	4759126.91	1462267.95	4017.22	167.38	2.79	0.046
Ruta alterna 5	114.88	7550910.43	4254051.47	11686.95	486.96	8.12	0.135

Apéndice H. Modelo numérico para el cálculo de los costos por decesos en accidentes

Nodo	A	B	C	D	TDPA			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	2932	22745
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	2635.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	2635.5	2932	22745
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	3910	2932	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	3910	22745	0	0

Nodo	A	B	C	D	TDPAsum*			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	0	0	0	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	0	0	4721	4721
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	0	4721	0	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	0	4721	4721	4721
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	4721	4721	0	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	4721	4721	0	0

* Vehículos que pasarían de más provenientes de la ruta original

Nodo	A	B	C	D	TDPAef**			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	7653	27466
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	7356.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	7356.5	7653	27466
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	8631	7653	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	8631	27466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				TDPAef**			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	8.8335	5.4585	0
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	8.8335	7.653	27.466
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	7.3565	5.4585	0
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	7.3565	7.653	27.466
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	8.631	7.653	5.4585	0
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	8.631	27.466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				Muertos/km/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.01	0.17	0.10	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.01	0.17	0.19	0.39
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.01	0.18	0.10	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0.01	0.18	0.19	0.39
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.19	0.19	0.10	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	0.19	0.39	0.00	0.00

* PT345 IMT

Nodo	Longitud por tramo (km)				Muertos/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	45.4	23.3	53.9	0	0.62	3.87	5.30	0.00
Ruta alterna 1	45.4	23.3	39.1	67.2	0.62	3.87	7.28	25.99
Ruta alterna 2	45.4	23.3	53.9	0	0.62	4.26	5.30	0.00
Ruta alterna 3	45.4	23.3	39.1	67.2	0.62	4.26	7.28	25.99
Ruta alterna 4	83.1	39.1	53.9	0	16.12	7.28	5.30	0.00
Ruta alterna 5	83.1	67.2	0	0	16.12	25.99	0.00	0.00

* PT345 IMT

TOTAL	CMU	CMUa	CMUd	CAXhr	CMUm	CMUs
(Muertos/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/min)	(\$/s)
9.79	\$ 9,787,723.79					
37.76	\$ 37,757,256.98	\$ 27,969,533.19	\$ 76,839.38	\$ 3,201.64	\$ 53.36	\$ 0.889
10.18	\$ 10,178,673.86	\$ 390,950.07	\$ 1,074.04	\$ 44.75	\$ 0.75	\$ 0.012
38.15	\$ 38,148,207.04	\$ 28,360,483.25	\$ 77,913.42	\$ 3,246.39	\$ 54.11	\$ 0.902
28.70	\$ 28,696,498.89	\$ 18,908,775.09	\$ 51,947.18	\$ 2,164.47	\$ 36.07	\$ 0.601
42.11	\$ 42,113,085.28	\$ 32,325,361.49	\$ 88,805.94	\$ 3,700.25	\$ 61.67	\$ 1.028

Apéndice I. Modelo numérico para el cálculo de los costos por heridos en accidentes

Nodo	A	B	C	D	TDPA			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	2932	22745
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	2635.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	2635.5	2932	22745
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	3910	2932	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	3910	22745	0	0

Nodo	A	B	C	D	TDPAsum*			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	0	0	0	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	0	0	4721	4721
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	0	4721	0	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	0	4721	4721	4721
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	4721	4721	0	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	4721	4721	0	0

* Vehículos que pasarían de más provenientes de la ruta original

Nodo	A	B	C	D	TDPAef**			
					A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A	20554	8833.5	5458.5	0
Ruta alterna 1	1	2	6	7	20554	8833.5	7653	27466
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	20554	7356.5	5458.5	0
Ruta alterna 3	1	3	6	7	20554	7356.5	7653	27466
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	8631	7653	5458.5	0
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	8631	27466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				TDPAef**			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	8.8335	5.4585	0
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	8.8335	7.653	27.466
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	20.554	7.3565	5.4585	0
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	20.554	7.3565	7.653	27.466
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	8.631	7.653	5.4585	0
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	8.631	27.466	0	0

** TDPA efectivo en cada tramo incluyendo los vehículos provenientes de la ruta principal

Nodo	Clasificación por tramo				Heridos/km/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	-0.09	0.88	0.59	0.00
Ruta alterna 1	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	-0.09	0.88	0.88	2.34
Ruta alterna 2	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	-0.09	0.86	0.59	0.00
Ruta alterna 3	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	-0.09	0.86	0.88	2.34
Ruta alterna 4	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	0	0.91	0.88	0.59	0.00
Ruta alterna 5	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles	0	0	0.91	2.34	0.00	0.00

* PT345

Nodo	Longitud por tramo (km)				Heridos/año*			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Ruta principal	45.4	23.3	53.9	0	-4.14	20.62	31.93	0.00
Ruta alterna 1	45.4	23.3	39.1	67.2	-4.14	20.62	34.33	157.43
Ruta alterna 2	45.4	23.3	53.9	0	-4.14	20.13	31.93	0.00
Ruta alterna 3	45.4	23.3	39.1	67.2	-4.14	20.13	34.33	157.43
Ruta alterna 4	83.1	39.1	53.9	0	75.87	34.33	31.93	0.00
Ruta alterna 5	83.1	67.2	0	0	75.87	157.43	0.00	0.00

* PT345

TOTAL	CHE	CHEa	CHEd	CHEhr	CHEm	CHEs
(Heridos/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/min)	(\$/s)
48.41	2420715.44					
208.25	10412340.19	7991624.74	21,955.01	914.79	15.25	0.254
47.93	2396276.19	-24439.25	67.14	2.80	0.05	-0.001
207.76	10387900.94	7967185.49	21,887.87	911.99	15.20	0.253
142.14	7106888.45	4686173.01	12,874.10	536.42	8.94	0.149
233.31	11665316.60	9244601.15	25,397.26	1,058.22	17.64	0.294

Apéndice J. Modelo numérico para el cálculo de tarifas de peaje

Tramo	1
Longitud (km)	45400.000
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	68.00	256180.34	256180.34
B	3.40%	160.514	163.00	26163.78	26163.78
C2	7.02%	331.2568333	82.00	27163.06	27163.06
C3	2.08%	98.35416667	142.00	13966.29	13966.29
T3S2	4.83%	228.1816667	250.00	57045.42	57045.42
T3S3	1.55%	73.1755	310.00	22684.41	22684.41
T3S2R4	1.02%	47.99683333	454.00	21790.56	21790.56
OTROS	0.30%	14.163	209.86	2972.21	2972.21
TOTAL				427966.07	427966.07

Tramo	2
Longitud (km)	23300.000
Tipo de terreno	M
IIR	6
Descripción	Atlacomulco - Acambay (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ -	\$ -	\$ -
B	3.40%	160.514	\$ -	\$ -	\$ -
C2	7.02%	331.2568333	\$ -	\$ -	\$ -
C3	2.08%	98.35416667	\$ -	\$ -	\$ -
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ -	\$ -	\$ -
T3S3	1.55%	73.1755	\$ -	\$ -	\$ -
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ -	\$ -	\$ -
OTROS	0.30%	14.163	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL				\$ -	\$ -

Tramo	3
Longitud (km)	23300.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Atlacmulco - Acambay (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ 25.00	\$ 94,183.95	\$ 94,183.95
B	3.40%	160.514	\$ 35.00	\$ 5,617.99	\$ 5,617.99
C2	7.02%	331.2568333	\$ 35.00	\$ 11,593.99	\$ 11,593.99
C3	2.08%	98.35416667	\$ 35.00	\$ 3,442.40	\$ 3,442.40
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ 55.00	\$ 12,549.99	\$ 12,549.99
T3S3	1.55%	73.1755	\$ 55.00	\$ 4,024.65	\$ 4,024.65
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ 95.00	\$ 4,559.70	\$ 4,559.70
OTROS	0.30%	14.163	\$ 47.86	\$ 677.80	\$ 677.80
				TOTAL	136,650.47

Tramo	4
Longitud (km)	53900.000
Tipo de terreno	M
IIR	4
Descripción	Acambay - Palmillas (57)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ -	\$ -	\$ -
B	3.40%	160.514	\$ -	\$ -	\$ -
C2	7.02%	331.2568333	\$ -	\$ -	\$ -
C3	2.08%	98.35416667	\$ -	\$ -	\$ -
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ -	\$ -	\$ -
T3S3	1.55%	73.1755	\$ -	\$ -	\$ -
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ -	\$ -	\$ -
OTROS	0.30%	14.163	\$ -	\$ -	\$ -
				TOTAL	\$ -

Tramo	5
Longitud (km)	83100.000
Tipo de terreno	L
IIR	8
Descripción	Toluca - Jilotepec (11)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ 34.00	\$ 128,090.17	\$ 128,090.17
B	3.40%	160.514	\$ 81.50	\$ 13,081.89	\$ 13,081.89
C2	7.02%	331.2568333	\$ 41.00	\$ 13,581.53	\$ 13,581.53
C3	2.08%	98.35416667	\$ 71.00	\$ 6,983.15	\$ 6,983.15
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ 125.00	\$ 28,522.71	\$ 28,522.71
T3S3	1.55%	73.1755	\$ 155.00	\$ 11,342.20	\$ 11,342.20
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ 227.00	\$ 10,895.28	\$ 10,895.28
OTROS	0.30%	14.163	\$ 104.93	\$ 1,486.10	\$ 1,486.10
				TOTAL	\$ 213,983.03

Tramo	6
Longitud (km)	39100.000
Tipo de terreno	L
IIR	4
Descripción	Acambay - Jilotepec (40D)
TDPARP (vpd)	4721

Variable	Pv1 (%)	Nv1 (veh)	Peaje (\$/veh)	PT (\$)	PT (\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ 80.00	\$ 301,388.64	\$ 301,388.64
B	3.40%	160.514	\$ 125.00	\$ 20,064.25	\$ 20,064.25
C2	7.02%	331.2568333	\$ 125.00	\$ 41,407.10	\$ 41,407.10
C3	2.08%	98.35416667	\$ 125.00	\$ 12,294.27	\$ 12,294.27
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ 180.00	\$ 41,072.70	\$ 41,072.70
T3S3	1.55%	73.1755	\$ 180.00	\$ 13,171.59	\$ 13,171.59
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ 295.00	\$ 14,159.07	\$ 14,159.07
OTROS	0.30%	14.163	\$ 158.57	\$ 2,245.85	\$ 2,245.85
				TOTAL	\$ 445,803.47

Variable	Pv1	Nv1	Peaje	PT	PT
	(%)	(veh)	(\$/veh)	(\$)	(\$)
Vehículo	Distribución de vehículos	No. De vehículos	Tarifa por vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo	Total de peaje por tipo de vehículo
A	79.80%	3767.358	\$ 77.00	\$ 290,086.57	\$ 290,086.57
B	3.40%	160.514	\$ 154.00	\$ 24,719.16	\$ 24,719.16
C2	7.02%	331.2568333	\$ 154.00	\$ 51,013.55	\$ 51,013.55
C3	2.08%	98.35416667	\$ 154.00	\$ 15,146.54	\$ 15,146.54
T3S2	4.83%	228.1816667	\$ 301.00	\$ 68,682.68	\$ 68,682.68
T3S3	1.55%	73.1755	\$ 436.00	\$ 31,904.52	\$ 31,904.52
T3S2R4	1.02%	47.99683333	\$ 436.00	\$ 20,926.62	\$ 20,926.62
OTROS	0.30%	14.163	\$ 244.57	\$ 3,463.87	\$ 3,463.87
				TOTAL	505,943.50

Tramo	7
Longitud (km)	67200.000
Tipo de terreno	L
IIR	2
Descripción	Jilotepec - Palmillas (57D)
TDPARP (vpd)	4721

Resumen por tramo

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
PT (\$)	\$ 427,966.07	\$ -	\$ 136,650.47	\$ -	\$ 213,983.03	\$ 445,803.47	\$ 505,943.50

Nodo	A	B	C	D	Peaje Total por ruta	CPd	CPhr	CPs	%
					(\$/día)	(\$/día)	(\$/hr)	(\$/s)	adimensional
Ruta principal	1	2	4	N/A	427966.07	0.00	0	0.000	1.000
Ruta alterna 1	1	2	6	7	1379713.04	951746.97	\$ 39,656.12	11.016	3.224
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	564616.54	136650.47	\$ 5,693.77	1.582	1.319
Ruta alterna 3	1	3	6	7	1516363.51	1088397.44	\$ 45,349.89	12.597	3.543
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	659786.50	231820.43	\$ 9,659.18	2.683	1.542
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	719926.53	291960.47	\$ 12,165.02	3.379	1.682

Apéndice K. Modelo General de Consecuencias

A) DATOS GENERALES DE LA RED CARRETERA

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
Clasificación	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles
Distribución del aforo vehicular de los tramos en condiciones normales de aforo							
A	79.75%	82.35%	63.50%	77.30%	81.20%	63.70%	68.30%
B	4.00%	2.55%	3.15%	3.65%	4.40%	3.60%	5.20%
C2	7.25%	6.70%	7.55%	7.10%	6.40%	7.05%	6.00%
C3	1.85%	2.00%	3.00%	2.40%	2.30%	2.95%	3.30%
T3S2	4.30%	3.50%	16.60%	6.70%	3.60%	16.25%	9.70%
T3S3	1.55%	1.30%	3.85%	1.80%	1.10%	3.55%	4.00%
T3S2R4	1.10%	1.25%	1.50%	0.70%	0.80%	1.95%	3.10%
OTROS	0.20%	0.35%	0.85%	0.35%	0.20%	0.95%	0.40%
TDPA (1 sentido)	20554	8833.5	2635.5	5458.5	3910	2932	22745
Tarifas de peaje para rutas seleccionadas							
A	\$ 68.00	\$ -	\$ 25.00	\$ -	\$ 34.00	\$ 80.00	\$ 77.00
B	\$ 163.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 81.50	\$ 125.00	\$ 154.00
C2	\$ 82.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 41.00	\$ 125.00	\$ 154.00
C3	\$ 142.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 71.00	\$ 125.00	\$ 154.00
T3S2	\$ 250.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 125.00	\$ 180.00	\$ 301.00
T3S3	\$ 310.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 155.00	\$ 180.00	\$ 436.00
T3S2R4	\$ 454.00	\$ -	\$ 95.00	\$ -	\$ 227.00	\$ 295.00	\$ 436.00
OTROS	\$ 209.86	\$ -	\$ 47.86	\$ -	\$ 104.93	\$ 158.57	\$ 244.57

B) CONFIGURACIÓN DE LA RUTA PRINCIPAL Y RUTAS ALTERNAS

Nodo	A	B	C	D
Ruta principal	1	2	4	N/A
Ruta alterna 1	1	2	6	7
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A
Ruta alterna 3	1	3	6	7
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A

TDPAef*	4721
Tramo interrumpido	4

* (TDPA EFECTIVO DE LA RUTA PRINCIPAL; ES EL QUE EXCLUSIVAMENTE VA DEL PRIMER AL ULTIMO PUNTO DE LA RUTA PRINCIPAL; NO EL TDPA TOTAL)

Es el tramo que dejará de operar y que ocasiona la búsqueda de rutas alternas para llegar al destino

NOTA: No se puede elegir N/A

C) DATOS COMPLEMENTARIOS

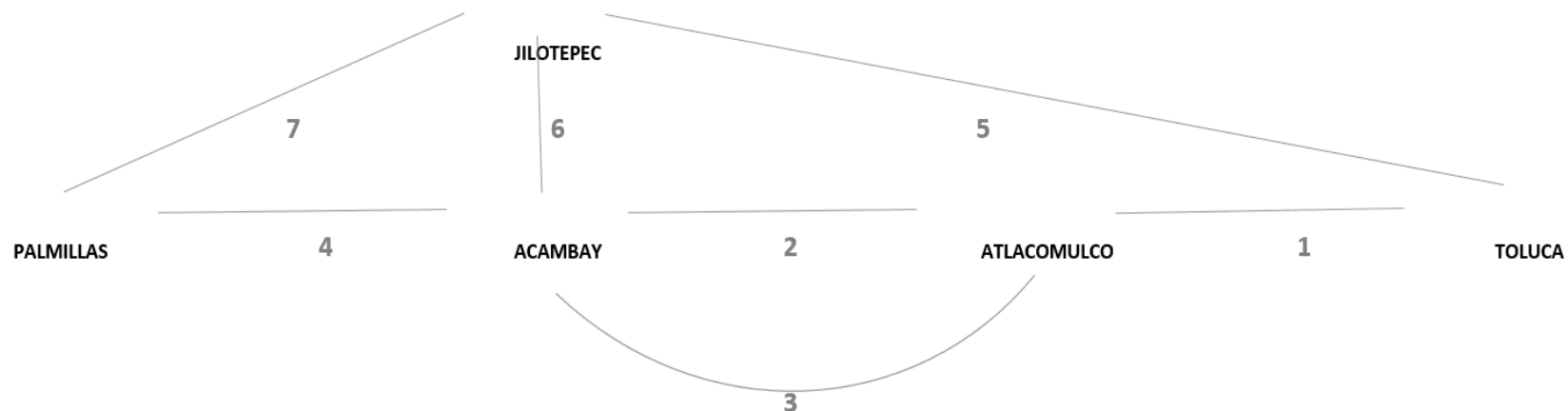
Variable	Valor	Unidad	Descripción
Js	42.793	hrs/semana	Horas laborables promedio a la semana (EdoMex)
Cmu	\$ 1,000,000.00	\$	Póliza de vida promedio aseguradora
Cher	\$ 50,000.00	\$	Póliza de accidente promedio aseguradora
CL	\$ 4,500.00	\$/ton	Costo de mercado por dejar de producir / limpiar una tonelada de CO2
SHP 2016	43.19	\$/hr	Valor del tiempo por motivo de trabajo del periodo en estudio
Sm	80.04	\$/día	Salario Mínimo vigente área geográfica única
\$\$	18.16	\$	Costo del dólar en MXN

D) RESULTADOS: CONSECUENCIAS ESPERADAS

Mejor ruta Alterna	Ruta alterna 5
---------------------------	-----------------------

Consecuencias (\$/s)	Valor
CTT	0.599
COP	7.977
CPRO	0.323
CMA	2.041
CPM	0.135
CMU	1.028
CHE	0.294
CP	3.379
TOTAL	15.777

1. Escenario



2. Datos generales de la red

Tramo	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
Longitud (m)	45400	23300	23300	53900	83100	39100	67200
Tipo de terreno	Lomerío	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Lomerío	Lomerío	Lomerío
IIR	4	6	4	4	8	4	2
Clasificación	CUOTA 2 Carriles	"B" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	"C" 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 2 Carriles	CUOTA 4+ Carriles

3. Rutas disponibles de la red

Nodo	A	B	C	D	Longitud Total (Km)	
Ruta principal	1	2	4	N/A	122.6	Ruta inválida
Ruta alterna 1	1	2	6	7	175	0
Ruta alterna 2	1	3	4	N/A	122.6	Ruta inválida
Ruta alterna 3	1	3	6	7	175	0
Ruta alterna 4	5	6	4	N/A	176.1	Ruta inválida
Ruta alterna 5	5	7	N/A	N/A	150.3	0

Tramo interrumpido

4

4. Distribución del aforo de la Red Carretera

Distribución del aforo vehicular de los tramos en condiciones normales de aforo*								
Vehículos	1	2	3	4	5	6	7	Ruta Principal
A	79.75%	82.35%	63.50%	77.30%	81.20%	63.70%	68.30%	79.80%
B	4.00%	2.55%	3.15%	3.65%	4.40%	3.60%	5.20%	3.40%
C2	7.25%	6.70%	7.55%	7.10%	6.40%	7.05%	6.00%	7.02%
C3	1.85%	2.00%	3.00%	2.40%	2.30%	2.95%	3.30%	2.08%
T3S2	4.30%	3.50%	16.60%	6.70%	3.60%	16.25%	9.70%	4.83%
T3S3	1.55%	1.30%	3.85%	1.80%	1.10%	3.55%	4.00%	1.55%
T3S2R4	1.10%	1.25%	1.50%	0.70%	0.80%	1.95%	3.10%	1.02%
OTROS	0.20%	0.35%	0.85%	0.35%	0.20%	0.95%	0.40%	0.30%

http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2016/15_MEXICO.pdf

5. Tránsito Diario Promedio Anual de la Red Carretera

Tránsito Diario Promedio Anual de la ruta carretera (un solo sentido)*							
Tramo	1	2	3	4	5	6	7
TDPA	20554	8833.5	2635.5	5458.5	3910	2932	22745

TDPAef

4721

(TDPA EFECTIVO; ES EL QUE EXCLUSIVAMENTE VA DEL PRIMER AL ÚLTIMO PUNTO DE LA RUTA PRINCIPAL; NO EL TDPA TOTAL)

* http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2016/15_MEXICO.pdf

6. Datos generales necesarios

Variable	Valor	Unidad	Descripción
Js	42.793	hrs/semana	Horas laborables promedio a la semana (EdoMex)*
SHP 2016	43.19	\$/hr	Valor del tiempo por motivo de trabajo en 2016*
Sm	80.04	\$/día	Salario Mínimo vigente área geográfica única
\$\$	18.16	\$	Costo del dólar en MXN
Cmu	1000000	\$	Póliza de vida promedio aseguradora
Cher	50000	\$	Póliza de accidente promedio aseguradora
CCO₂	4500	\$/ton	Costo de mercado por dejar de producir / limpiar una tonelada de CO ₂

* <http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=422&IdBoletin=158>

7. Velocidad propuesta para las rutas alternas

Vehículos	Velocidad promedio f(TT,IIR) (km/hr)*						
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
A	65.94	50.76	51.46	51.46	60.90	65.94	66.72
B	62.12	46.94	47.52	47.52	57.38	62.12	62.78
C2	53.77	41.23	42.09	42.09	48.37	53.77	54.69
C3	46.26	34.86	35.38	35.38	42.88	46.26	46.88
T3S2	50.12	36.76	37.57	37.57	42.90	50.12	51.04
T3S3	43.36	31.68	32.21	32.21	38.80	43.36	44.00
T3S2R4	34.00	24.85	25.16	25.16	31.77	34.00	34.42
OTROS	50.80	38.15	38.77	38.77	46.14	50.80	51.50

* <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>

8. Costos de operación propuestos para las rutas alternas

Vehículos	COV promedio f(TT,IIR) (\$/km)*						
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
A	4.81	5.72	5.42	5.42	5.53	4.81	4.58
B	17.18	21.74	21.01	21.01	18.59	17.18	16.56
C2	10.66	14.00	13.08	13.08	12.40	10.66	9.76
C3	15.12	20.04	19.09	19.09	16.91	15.12	14.20
T3S2	19.96	25.93	24.59	24.59	22.69	19.96	18.67
T3S3	23.50	30.91	29.46	29.46	26.40	23.50	22.10
T3S2R4	31.16	41.40	39.64	39.64	34.61	31.16	29.48
OTROS	17.48	22.82	21.76	21.76	19.59	17.48	16.48

* <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>

9. Costos de operación propuestos para las rutas alternas

Vehículos	Tarifas de peaje para rutas seleccionadas* **						
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Descripción	Toluca - Atlacomulco (57)	Atlacomulco - Acambay (57)	Atlacomulco - Acambay (40D)	Acambay - Palmillas (57)	Toluca - Jilotepec (11)	Acambay - Jilotepec (40D)	Jilotepec - Palmillas (57D)
A	\$ 68.00	\$ -	\$ 25.00	\$ -	\$ 34.00	\$ 80.00	\$ 77.00
B	\$ 163.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 81.50	\$ 125.00	\$ 154.00
C2	\$ 82.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 41.00	\$ 125.00	\$ 154.00
C3	\$ 142.00	\$ -	\$ 35.00	\$ -	\$ 71.00	\$ 125.00	\$ 154.00
T3S2	\$ 250.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 125.00	\$ 180.00	\$ 301.00
T3S3	\$ 310.00	\$ -	\$ 55.00	\$ -	\$ 155.00	\$ 180.00	\$ 436.00
T3S2R4	\$ 454.00	\$ -	\$ 95.00	\$ -	\$ 227.00	\$ 295.00	\$ 436.00
OTROS	\$ 209.86	\$ -	\$ 47.86	\$ -	\$ 104.93	\$ 158.57	\$ 244.57

* <http://www.arconorte.com.mx/recorridos/>

** <http://app.sct.gob.mx/>

10. Indicadores generales propuestos

Vehículos	Rendimiento carretero promedio del vehículo (km/l) *	Emisiones promedio de CO ₂ (g/km)**	Personas promedio por vehículo***
A	16	206.90	2.28
B	3.97	426.38	12.81
C2	4.58	298.98	1.37
C3	2.94	924.03	1.23
T3S2	2.01	831.63	1.14
T3S3	1.37	1396.2483	1.14
T3S2R4	1.7	1535.8731	1.09
OTROS	4.65	802.86	1.09

* <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>

** <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt339.pdf>

<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/O-D-2013/ZONA-2/7.6.->

*** [_SAN_SEBASTIAN.pdf](#)

11. Resumen de costos indirectos (\$/segundo) Subtramo interrumpido = 4

Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5	Descripción
MODELO I	CTT	\$ 1.935	Ruta inválida	\$ 1.913	Ruta inválida	\$ 0.599	Costo generado por las horas hombre perdidas al quedar impedido el paso por el puente vehicular
MODELO II	COP	\$ 15.349	Ruta inválida	\$ 14.767	Ruta inválida	\$ 7.977	Costo operacional*
MODELO III	CPRO	\$ 0.323	Ruta inválida	\$ 0.323	Ruta inválida	\$ 0.323	CI generado por la baja productividad de las personas afectadas por las labores de mantenimiento
MODELO IV	CMA	\$ 3.861	Ruta inválida	\$ 3.861	Ruta inválida	\$ 2.041	Costo generado por afectaciones al medio ambiente
MODELO V	CPM	\$ 0.159	Ruta inválida	\$ 0.156	Ruta inválida	\$ 0.135	Costo ocasionado por las pérdidas materiales derivadas de accidentes
MODELO VI	CMU	\$ 0.889	Ruta inválida	\$ 0.902	Ruta inválida	\$ 1.028	Costo generado por decesos en accidentes
MODELO VII	CHE	\$ 0.254	Ruta inválida	\$ 0.253	Ruta inválida	\$ 0.294	Costo generado por heridos en accidentes
MODELO VIII	CP	\$ 11.016	Ruta inválida	\$ 12.597	Ruta inválida	\$ 3.379	Costo generado por tramos con peaje
CONSECUENCIAS	(\$/s)	\$ 33.787	Ruta inválida	\$ 34.773	Ruta inválida	\$ 15.777	CI = CIHH + CIOP + CIPRO + CIMA + CIAX + CIMU + CIHER + CIPEA

incluye aumento en consumo de combustible, lubricantes, llantas, tiempo de operador, mano de obra de mantenimiento,

* refacciones, depreciación, interés, otros indirectos)

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt471.pdf>

* f

Nota: Las rutas conformadas por algún nodo interrumpido aparecen como "Ruta inválida"

****La ruta que genera las menores consecuencias es la Ruta alterna 5 el valor de las consecuencias de esta ruta es: \$ 15.777**

12. Matriz CRP/CRI (Relación entre los costos generados en la ruta principal y los costos generados en las rutas alternas)

Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	125%	Ruta inválida	125%	Ruta inválida	108%
MODELO II	COP	128%	Ruta inválida	127%	Ruta inválida	115%
MODELO III	CPRO	103%	Ruta inválida	103%	Ruta inválida	103%
MODELO IV	CMA	143%	Ruta inválida	143%	Ruta inválida	123%
MODELO V	CPM	252%	Ruta inválida	249%	Ruta inválida	229%
MODELO VI	CMU	386%	Ruta inválida	390%	Ruta inválida	430%
MODELO VII	CHE	430%	Ruta inválida	429%	Ruta inválida	482%
MODELO VIII	CP	322%	Ruta inválida	354%	Ruta inválida	168%

13. Matriz Gasto /Ahorro

Modelo	Identificador	Ruta alterna 1	Ruta alterna 2	Ruta alterna 3	Ruta alterna 4	Ruta alterna 5
MODELO I	CTT	-25%	Ruta inválida	-25%	Ruta inválida	-8%
MODELO II	COP	-28%	Ruta inválida	-27%	Ruta inválida	-15%
MODELO III	CPRO	-3%	Ruta inválida	-3%	Ruta inválida	-3%
MODELO IV	CMA	-43%	Ruta inválida	-43%	Ruta inválida	-23%
MODELO V	CPM	-152%	Ruta inválida	-149%	Ruta inválida	-129%
MODELO VI	CMU	-286%	Ruta inválida	-290%	Ruta inválida	-330%
MODELO VII	CHE	-330%	Ruta inválida	-329%	Ruta inválida	-382%
MODELO VIII	CP	-222%	Ruta inválida	-254%	Ruta inválida	-68%

Apéndice L. Distribuciones probabilísticas propuestas para SHP, SM y TC

HORAS LABORADAS POR MOTIVO DE TRABAJO (SHP)				
AÑO	VALOR DEL TIEMPO POR TRABAJO	HORAS LABORADAS POR SEMANA	SALARIO MÍNIMO GENERAL PROMEDIO(SMGP)	FUENTE
2009	24.14	44.45	2.88	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=326&IdBoletin=116
2010	25.31	44.45	2.88	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=340&IdBoletin=123
2011	26.35	44.45	2.88	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=351&IdBoletin=129
2012	32.65			http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=366&IdBoletin=136
2013	34.07	42.79	3.3	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=373&IdBoletin=140
2014	35.39	42.79	3.29	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=388&IdBoletin=147
2015	36.88	42.79	3.29	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=406&IdBoletin=153
2016	39.42	42.79	3.29	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=422&IdBoletin=158
2017	43.19	42.79	3.29	http://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=440&IdBoletin=164

DISTRIBUCIÓN PROPUESTA: BETA	
Valor P (KS)	0.92117
alfa	0.50074
beta	0.57054
a	24.14
b	43.19

AÑO	SALARIO MINIMO SM (\$/dia)
1996	23.07
1997	26.45
1998	30.2
1999	34.45
2000	37.9
2001	40.35
2002	42.15
2003	43.65
2004	45.24
2005	46.8
2006	48.67
2007	50.57
2008	52.59
2009	54.8
2010	57.46
2011	59.82
2012	62.33
2013	64.76
2014	67.29
2015	70.1
2016	73.04
2017	80.04

(CONASAMI, 2017)

<https://www.gob.mx/conasami>

DISTRIBUCIÓN PROPUESTA: LOGNORMAL	
Valor P (X2)	0.94962
media	3.8737
Desv. Est.	0.32301

Título	Tipo de cambio Pesos por dólar E.U.A., Para solventar obligaciones denominadas en moneda extranjera		
Unidad	Pesos por Dólar	Unidad	Pesos por Dólar
Ene 2015	14.9885	May 2016	18.4118
Feb 2015	14.9553	Jun 2016	18.4646
Mar 2015	15.2647	Jul 2016	18.7837
Abr 2015	15.3714	Ago 2016	18.8611
May 2015	15.3815	Sep 2016	19.3776
Jun 2015	15.6854	Oct 2016	18.8887
Jul 2015	16.0772	Nov 2016	20.5155
Ago 2015	16.7829	Dic 2016	20.6194
Sep 2015	16.9053	Ene 2017	20.7908
Oct 2015	16.5244	Feb 2017	19.9957
Nov 2015	16.5856	Mar 2017	18.7955
Dic 2015	17.2487	Abr 2017	18.9594
Ene 2016	18.1935	May 2017	18.6909
Feb 2016	18.1020	Jun 2017	18.0626
Mar 2016	17.2370	Jul 2017	17.8646
Abr 2016	17.1767	Ago 2017	17.8145
		Sep 2017	18.1590

<http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioIntern etAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF85§or=6 &locale=es>

Fuente

DISTRIBUCIÓN PROPUESTA: NORMAL	
Valor P (X2)	0.91281
Media	17.743
Desv. Est.	1.646

Apéndice M. Rutina (macro) para exportación de datos de Excel

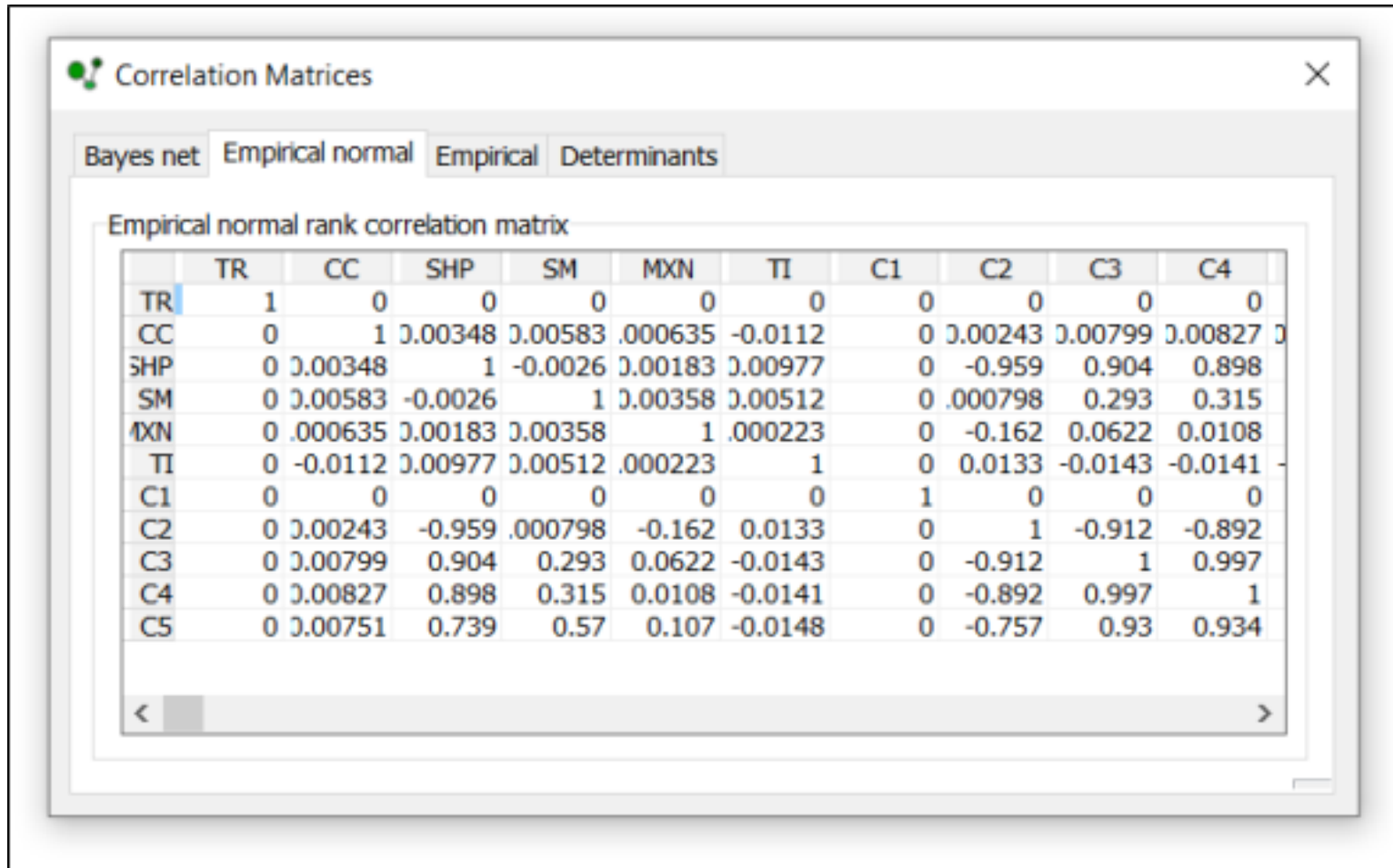
```
Sub Red()  
Dim texto As Variant  
Dim n As Integer  
  
n = 10000  
  
For i = 1 To n  
  
Open "Red.sae" For Append As #1  
  
Range("A1").Select  
Selection.Value = 1  
  
texto1 = Cells(1, 3).Value  
texto2 = Cells(2, 3).Value  
texto3 = Cells(3, 3).Value  
texto4 = Cells(4, 3).Value  
texto5 = Cells(5, 3).Value  
texto6 = Cells(6, 3).Value  
texto7 = Cells(7, 3).Value  
texto8 = Cells(8, 3).Value  
texto9 = Cells(9, 3).Value  
texto10 = Cells(10, 3).Value  
texto11 = Cells(11, 3).Value  
  
Print #1, texto1 & ", " & texto2 & ", " & texto3 & ", " & texto4 & ", " & texto5 & ", " & texto6 & ", " & texto7 & ", " & texto8 & ", " & texto9 & ", " & texto10  
& ", " & texto11  
  
Close #1  
  
Next i  
  
End Sub
```

Apéndice N. Matrices de coeficientes de correlación del MGC obtenidas en *Uninet*

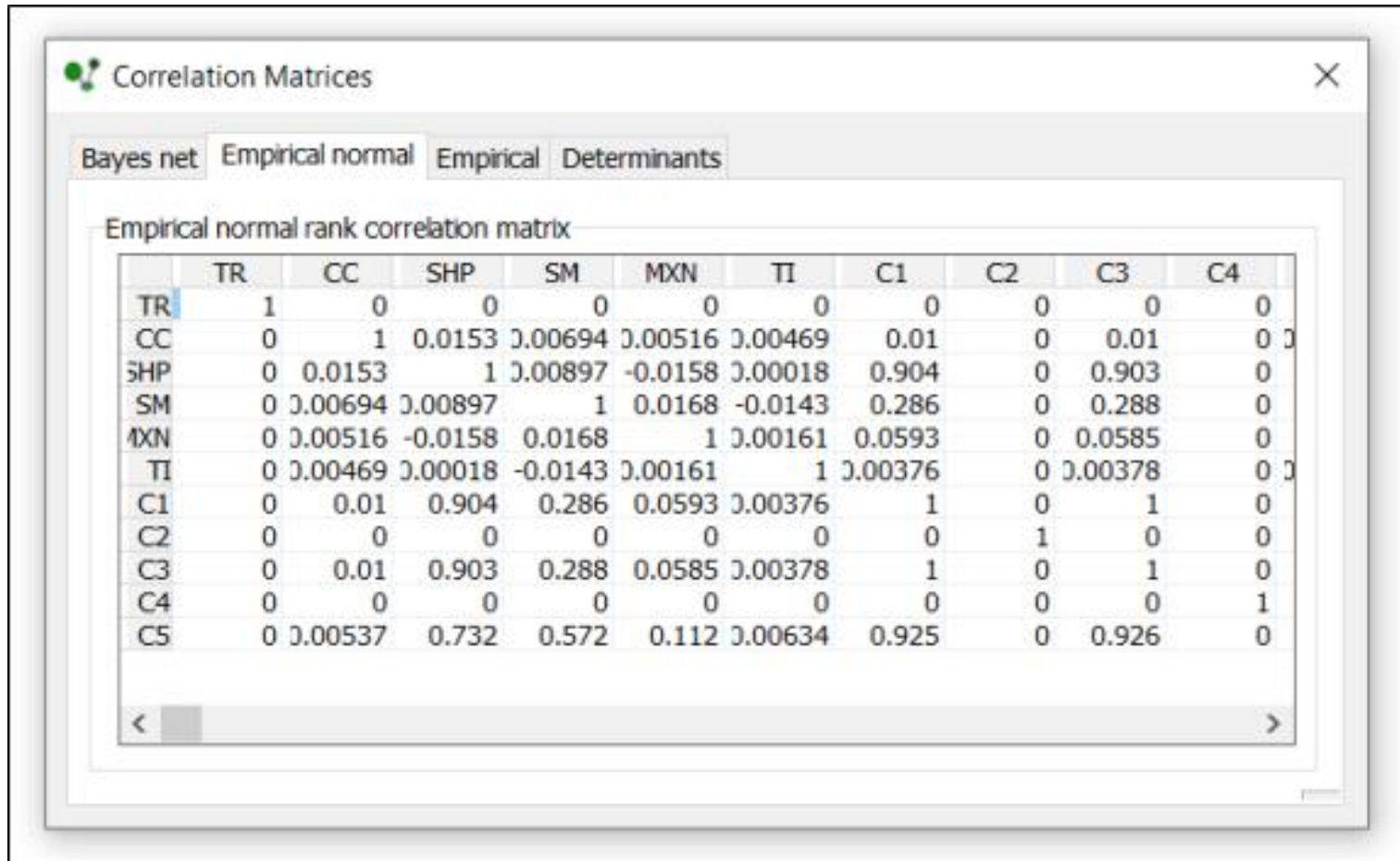
Escenario de falla I: Interrupción del subtramo 1

	TR	CC	SHP	SM	MXN	TI	C1	C2	C3	C4	C5
TR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CC	0	1	0.0119	0.0099	-0.0127	0.00991	0	0	0	0.016	0.0147
SHP	0	0.0119	1	0.00435	0.00371	-0.0168	0	0	0	0.898	0.733
SM	0	0.0099	0.00435	1	0.0177	-0.0096	0	0	0	0.321	0.583
MXN	0	-0.0127	0.00371	0.0177	1	0.0171	0	0	0	0.0201	0.118
TI	0	0.00991	-0.0168	-0.0096	0.0171	1	0	0	0	-0.0184	-0.019
C1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
C4	0	0.016	0.898	0.321	0.0201	-0.0184	0	0	0	1	0
C5	0	0.0147	0.733	0.583	0.118	-0.019	0	0	0	0	0.93

Escenario de falla II: Interrupción del subtramo 2



Escenario de falla III: Interrupción del subtramo 4



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición de la red nacional de carreteras	14
Figura 1.2 Clasificación funcional del sistema vial	17
Figura 1.3 Jerarquía de un sistema vial urbano	18
Figura 1.4 Clasificación de carreteras por su TDPA.....	21
Figura 1.5 Clasificación de caminos SCT.....	22
Figura 1.6 Ejemplo de camino de terracería	22
Figura 1.7 Tipos de revestimiento.....	23
Figura 1.8 Ejemplo de sección transversal de una estructura de pavimento.....	23
Figura 1.9 Mapa de las Mesorregiones de México	26
Figura 1.10 Mapa de los ejes transversales y longitudinales de México	27
Figura 1.11 Principales ejes de carreteras del Edo de México.....	30
Figura 1.12 Infraestructura vial primaria libre de peaje del Edo de México	31
Figura 2.1 Gráfica del estado de la red carretera libre de peaje	36
Figura 2.2 y 2.3 Eventos climáticos extremos en carreteras.	41
Figura 2.4 Cierre por inundación de la México-Toluca en el kilómetro 24+500.....	42
Figura 2.5 Cierre por lluvia de la México-Toluca en el kilómetro 24+500	42
Figura 2.6 y 2.7 Ejemplos de deslizamiento	43
Figura 2.8 Deslave y cierre total de la autopista México-Querétaro.....	43
Figura 2.9 Deslizamiento y cierre parcial en la carretera México Toluca	44
Figura 2.10 y 2.11 Cierres por granizo de la carretera México-Toluca	45
Figura 2.12 Cierre parcial por incendio en la carretera Chamapa-Lechería	46
Figura 2.13 y 2.14 Cierres parciales por rehabilitación de la carretera Federal 57.....	46
Figura 2.15 Indicadores de estabilidad de caminos en función a su TDPA.....	48
Figura 2.16 y 2.17 Cierre de la carretera Toluca-Tenango por Antorcha Campesina	49
Figura 2.18 y 2.19 Bloqueo de la carretera la carretera Toluca-Palmillas	50
Figura 2.20 Manifestaciones recurrentes de transportistas en el tramo Toluca-Palmillas ...	50
Figura 2.21 Efecto de las peregrinaciones en el tramo Toluca-Palmillas	50
Figura 2.22 y 2.23 Narco bloqueos en la zona centro y norte del país	51
Figura 2.24 Ejemplo de alertas emitidas en el portal de rutas punto a punto.....	52
Figura 4.1 Tramo Toluca-Palmillas y subtramos que lo conforman.....	83
Figura 4.2 Accidente vehicular y cierre total de la Toluca-Atlaacomulco	84
Figura 4.3 Cierre total por accidente de la carretera Toluca-Atlaacomulco	84
Figura 4.4 y 4.5 Cierre total por normalistas en la carretera Toluca-Atlaacomulco.....	85
Figura 4.6 y 4.7 Deslaves y cierres de la carretera Atlaacomulco – Acambay.....	85
Figura 4.8 y 4.9 Hundimientos en la carretera Acambay-Palmillas.....	86
Figura 4.10 Rutas alternas disponibles al interrumpirse ruta principal propuesta	88
Figura 4.11 a 4.15 Rutas alternas disponibles.....	89
Figura 4.16 Conformación de la ruta principal y subtramos de apoyo	92
Figura 4.17 Ruta alterna 1	93
Figura 4.18 Ruta alterna 2	93
Figura 4.19 Ruta alterna 3	93
Figura 4.20 Ruta alterna 4.....	94
Figura 4.21 Ruta alterna 5	94

Figura 4.22 Escenario de falla I	118
Figura 4.23 Escenario de falla II	118
Figura 4.24 Escenario de falla III.....	119
Figura 5.1 Apartado de <i>Datos Generales</i> del MGC.....	122
Figura 5.2 Apartado de <i>Configuración de Rutas</i> del MGC.....	123
Figura 5.3 Apartado de <i>Datos Complementarios</i> del MGC.....	123
Figura 5.4 Apartado de <i>Resumen de Consecuencias</i> del MGC.....	124
Figura 5.5 Consecuencias para las rutas 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 1	126
Figura 5.6 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 4.....	127
Figura 5.7 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5.....	128
Figura 5.8 Consecuencias para las rutas 2, 3, 4 y 5 dada la interrupción del subtramo 2..	130
Figura 5.9 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 2.....	131
Figura 5.10 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 3.....	131
Figura 5.11 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 4.....	132
Figura 5.12 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5.....	132
Figura 5.13 Consecuencias para las rutas 1, 3 y 5 dada la interrupción del subtramo 4....	134
Figura 5.14 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 1.....	135
Figura 5.15 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 3.....	135
Figura 5.16 Composición de las consecuencias esperadas para la ruta alterna 5.....	136
Figura 5.17 Relación entre las variables aleatorias propuestas y las consecuencias.....	141
Figura 5.18 Red bayesiana propuesta para el MGC.....	141
Figura 5.19 Implementación en UNINET de la red bayesiana propuesta para el MGC....	142
Figura 5.20 Resultados para valores condicionados de SHP, SM y TC	143
Figura 5.21 Correlación entre SHP y las consecuencias, dado el escenario de falla I.....	144
Figura 5.22 Correlación entre SHP y las consecuencias, dado el escenario de falla II.....	145
Figura 5.23 Correlación entre SHP y las consecuencias, dado el escenario de falla III	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tránsito de vehículos en autopistas a cargo de CAPUFE.....	24
Tabla 1.2 Jerarquización de las autopistas de cuota con mayor aforo vehicular	25
Tabla 1.3 Principales ejes de carreteras del Edo. de México	30
Tabla 2.1 Eventos climáticos más frecuentes en México.....	41
Tabla 2.2 Accidentes de tránsito reportados en la república mexicana durante 2016	49
Tabla 2.3 Eventos climáticos más frecuentes registrados entre 1970 y 2013 en México	53
Tabla 2.4 Consecuencias de la interrupción de diversos servicios de infraestructura	54
Tabla 4.1 Configuración del aforo por tipo de vehículo en los subtramos de estudio	90
Tabla 4.2 Principales características de los tramos que conforman a la ruta principal.....	91
Tabla 4.3 Conformación de la ruta principal y rutas alternas, así como su longitud total ...	92
Tabla 4.4 Conformación del aforo vehicular de los 3 subtramos de la ruta principal.....	96
Tabla 4.5 TDPA Efectivo para la ruta en estudio	97
Tabla 4.6 Tiempo total acumulado de los usuarios al utilizar el subtramo 1	98
Tabla 4.7 Tiempos de recorrido acumulado para la ruta principal y rutas alternas	99
Tabla 4.8 Cálculo de las pérdidas ocasionadas por el aumento del tiempo de traslado.....	100
Tabla 4.9 Resumen de las personas afectadas por día en el trayecto de estudio.....	102
Tabla 4.10 Resumen de las personas afectadas por día en el trayecto de estudio.....	102
Tabla 4.11 Costos de operación base por tipo de vehículo	104
Tabla 4.12 Incremento esperado en el costo de operación al utilizar una ruta alterna.....	105
Tabla 4.13 Costos de las afectaciones al medio ambiente	107
Tabla 4.14 Costos equivalentes para la emisión de CO ₂ a la atmosfera.....	108
Tabla 4.15 Accidentes esperados por kilómetro	109
Tabla 4.16 Accidentes esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas	110
Tabla 4.17 Costo esperado por accidentes al utilizar la ruta principal y rutas alternas	111
Tabla 4.18 Decesos esperados por kilómetro al año	112
Tabla 4.19 Decesos esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas	112
Tabla 4.20 Costo esperado por decesos derivados de accidentes	113
Tabla 4.21 Heridos esperados por kilómetro al año.....	114
Tabla 4.22 Heridos esperados en el año al utilizar la ruta principal y rutas alternas	114
Tabla 4.23 Costo esperado por heridos derivados de accidentes	115
Tabla 4.24 Tarifas de peaje por tipo de vehículo para los subtramos en estudio,.....	116
Tabla 4.25 Costos esperados por tarifas de peaje derivadas del aforo vehicular efectivo .	116
Tabla 4.26 Costos esperados por la utilización de rutas alternas	117
Tabla 4.27 Disponibilidad de las rutas alternas en función de la interrupción	119
Tabla 5.1 Consecuencias esperadas dada la interrupción del subtramo 1.....	125
Tabla 5.2 Consecuencias esperadas dada la interrupción del subtramo 2.....	129
Tabla 5.3 Consecuencias esperadas dada la interrupción del subtramo 4.....	133
Tabla 5.4 Comparación entre los costos generados en las rutas alternas	137
Tabla 5.5 Matriz de ahorro y gasto para cada una de las rutas	138
Tabla 5.6 Variables aleatorias consideradas para el modelo.....	140
Tabla 5.7 Consecuencias para los escenarios disponibles dado el valor de SHP.....	146
Tabla 5.8 Consecuencias para los escenarios disponibles dado el valor de SM.....	146
Tabla 5.9 Consecuencias para los escenarios disponibles dado el valor de TC.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

BANXICO	Banco de México
CANACAR	Cámara Nacional del Autotransporte de Carga
CAPUFE	Caminos y Puentes Federales
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CNPC	Coordinación Nacional de Protección Civil
CONASAMI	Comisión Nacional de Salarios Mínimos
DGST	Dirección General de Servicios Técnicos
FONDEN	Fondo de Desastres Naturales
GCM	General Consequence Model
IEECC	Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático
IIR	Índice Internacional de Rugosidad
IMCO	Instituto Mexicano para la Competitividad
IMT	Instituto Mexicano del Transporte
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MGC	Modelo General de Consecuencias
PIB	Producto Interno Bruto
RUC	Road User Costs
SAASCAEM	Sistema de Autopistas, Aeropuertos, Servicios Conexos y Auxiliares del Estado de México
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SEGOB	Secretaría de Gobernación
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SINAPROC	Sistema Nacional de Protección Civil
SMAGEM	Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México
TDPA	Tránsito Promedio Diario Anual
VOC	Vehicle Operating Costs
VOCMEX	Vehicle Operating Cost México

